

**VŠB – Technická univerzita Ostrava**  
**Fakulta elektrotechniky a informatiky**  
**Katedra elektroniky**

Návrh a realizace měniče napětí 12 V DC / 230 V AC  
Design and Implementation of 12 V DC / 230 V AC Voltage  
Converter

## Zadání bakalářské práce

Student:

**Miroslav Kufa**

Studijní program:

B0714A060012 Aplikovaná elektronika

Téma:

Návrh a realizace měniče napětí 12 V DC / 230 V AC  
Design and Implementation of 12 V DC / 230 V AC Voltage Converter

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rešerši existujících topologií měničů 12 V DC / 230 V AC, srovnajte jejich výhody a nevýhody, popište nejběžnější typy těchto měničů dle tvaru a parametrů výstupního napětí (obdélík, modifikovaný sinus, sinus).
2. Sestavte a odladte simulační model vybrané topologie měniče či jeho výkonové části např. v prostředí OrCAD/PSpice. Na získaném simulačním modelu proveďte výkonovou analýzu s ohledem na zatěžovací charakteristiky a celkovou účinnost měniče.
3. Vybrané zapojení realizujte, oživte a měřením ověřte jeho funkčnost.
4. Srovnajte získané simulační a experimentální výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Krejčířík, A. Moderní spínané zdroje, 1. vydání. Praha: BEN - technická literatura, 1999.
2. Basso, CH. P. Switch-Mode Power Supplies - Spice Simulations and Practical Designs. New York: McGraw-Hill Professional, 2008.
3. Horký, Jan. Měnič 12, 24 V/230 V, 250 W a měnič 24V /230 V, 650 W. A radio. Praktická elektronika. 2003, 8(3), 13-18. ISSN 1211-328X.
4. [http://danyk.cz/menic230\\_5.html](http://danyk.cz/menic230_5.html)
5. [http://danyk.cz/menic230\\_6.html](http://danyk.cz/menic230_6.html)

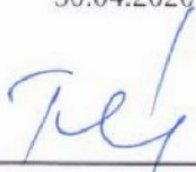
Další tituly doporučené literatury dle pokynů vedoucího bakalářské práce.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Aleš Havel, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2019

Datum odevzdání: 30.04.2020



doc. Ing. Petr Palacký, Ph.D.  
vedoucí katedry



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.  
děkan fakulty

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 12. 5. 2020

Kufn

podpis studenta

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Aleši Havlovi Ph.D., za pomoc při realizaci této práce, poskytnutí cenných rad a také za trpělivost. Mé poděkování dále patří panu Ing. Danielovi Kouřilovi za pomoc při výrobě DPS ve školní dílně.

## Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá měničem z napětí 12 V stejnosměrných na napětí 230 V střídavých. Cílem práce je analyzovat chování simulovaného měniče a následně jej porovnat se změřeným realizovaným zapojením. V první části jsou teoreticky rozebrány možnosti realizace měniče, popsán výběr součástek a jejich dimenzování. Ve druhé části jsou provedeny simulace pomocí softwaru OrCAD / PSpice. Třetí část se věnuje praktické realizaci měniče, jsou navrženy desky plošných spojů a je provedeno měření.

## Klíčová slova

Měnič napětí, střídač, simulace, zatěžovací charakteristika, účinnost

## Abstract

This bachelor thesis deals with a voltage converter, which creates 230V AC from a 12 V DC lead acid battery. The purpose of this thesis is to analyze behaviour of the converter and compare it with an implemented converter. The first part is focused on possible options of implementation of the converter, choosing components and their dimensioning. In the second part there are simulations of the converter in the OrCAD / PSpice software. The third part is focused on the practical realization of the converter, design of the printed circuit boards and the measurements.

## Key words

Voltage converter, inverter, simulation, load characteristics, efficiency

# Obsah

Seznam symbolů a zkratk .....	7
Úvod .....	10
1 Popis existujících zapojení .....	11
1.1 Zapojení s výstupním obdélníkovým signálem .....	11
1.2 Zapojení s výstupním modifikovaným sinusovým signálem .....	13
1.3 Zapojení s výstupním harmonickým signálem .....	15
2 Výběr zapojení .....	17
3 Výběr součástek a jejich dimenzování .....	18
3.1 Integrovaný obvod IR2153 .....	18
3.2 Návrh komparátoru pro odpojení akumulátoru .....	20
3.3 Výběr spínacích tranzistorů .....	23
3.4 Návrh chladičů pro výkonové tranzistory .....	24
3.5 Výběr transformátoru .....	25
4 Simulační ověření vybraného zapojení .....	27
4.1 Simulace měniče v programu OrCAD/PSpice .....	27
4.2 Simulace komparátoru pro ochranu akumulátoru v programu OrCAD/PSpice .....	34
5 Realizace zapojení a návrh desek plošných spojů .....	36
6 Ověření funkčnosti měniče a měření .....	41
6.1 Schémata zapojení pro měření .....	41
6.2 Tabulky naměřených hodnot .....	43
6.3 Naměřené charakteristiky měniče .....	44
6.4 Průběhy napětí a proudů měniče .....	45
7 Zhodnocení výsledků a závěr .....	48
Seznam použité literatury .....	50
Seznam obrázků a tabulek .....	51

## Seznam symbolů a zkratk

$d$	Střída výstupního signálu budiče	(%)
$C_{ISS}$	Vstupní kapacita tranzistoru	(F)
$f$	Frekvence signálu	(Hz)
$f_{VYST}$	Frekvence výstupního signálu budiče	(Hz)
$I_{Ief}$	Efektivní hodnota proudu tekoucího vinutím s vyšším napětím transformátoru (simulace)	(A)
$I_{2ef}$	Efektivní hodnota proudu tekoucího vinutím s vyšším napětím transformátoru (simulace)	(A)
$I_{2N}$	Jmenovitá efektivní hodnota proudu tekoucího sekundárním vinutím transformátoru	(A)
$i_{AKU}$	Okamžitá hodnota proudu tekoucího z akumulátoru do měniče	(A)
$I_{AKU}$	Střední hodnota proudu tekoucího z akumulátoru do měniče	(A)
$I_D$	Nepřetržitý proud drainem tranzistoru	(A)
$I_{N(RMS)}$	Jmenovitý efektivní proud procházející tranzistorem	(A)
$I_{O-}$	Výstupní proud budiče (log.0)	(A)
$I_{O+}$	Výstupní proud budiče (log.1)	(A)
$i_Z$	Okamžitá hodnota proudu tekoucího zátěží vinutí vyššího napětí transformátoru	(A)
$I_Z$	Efektivní hodnota proudu tekoucího zátěží vinutí vyššího napětí transformátoru	(A)
$k$	Koeficient přetížitelnosti tranzistoru	-
$L_1$	Indukčnost primárního vinutí transformátoru	(H)
$L_2$	Indukčnost sekundárního vinutí transformátoru	(H)
$P_D$	Maximální dovolený ztrátový výkon tranzistoru	(W)
$P_{F(AV)}$	Střední hodnota ztrátového výkonu jednoho tranzistoru	(W)
$P_{Z\dot{A}R}$	Činný výkon žárovky	(W)
$R_{i\_BAT}$	Sériový odpor akumulátoru	( $\Omega$ )
$R_{2N}$	Jmenovitý odpor zátěže primárního vinutí transformátoru	( $\Omega$ )
$R_{DS(ON)}$	Odpor vodivého kanálu tranzistoru v sepnutém stavu	( $\Omega$ )

$R_H$	Zpětnovazební odpor komparátoru	( $\Omega$ )
$R_{\theta CS}$	Tepelný odpor mezi pouzdem tranzistoru a chladičem	( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )
$R_{\theta JC}$	Tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem tranzistoru	( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )
$R_{\theta SA}$	Tepelný odpor chladiče	( $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ )
$S_N$	Jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru	(VA)
$t_{d(\text{off})}$	Doba zpoždění tranzistoru při vypínání	(s)
$t_{d(\text{on})}$	Doba zpoždění tranzistoru při zapínání	(s)
$t_d$	Ochranná doba mezi výstupními pulzy	(s)
$t_f$	Doba poklesu výstupního napětí	(s)
$T_{j(\text{max})}, \vartheta_{j(\text{max})}$	Maximální teplota přechodu tranzistoru	( $^{\circ}\text{C}$ )
$t_{\text{off}}$	Doba vypnutí tranzistoru	(s)
$t_{\text{on}}$	Doba zapnutí tranzistoru	(s)
$t_r$	Doba náběhu výstupního napětí	(s)
$t_{SD}$	Zpoždění při vypnutí	(s)
$U_{1\text{ef}}$	Efektivní hodnota napětí na primárním vinutí transformátoru (simulace)	(V)
$U_{1N}$	Jmenovitá efektivní hodnota napětí na primárním vinutí transformátoru	(V)
$U_{2\text{ef}}$	Efektivní hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru (simulace)	(V)
$U_{2N}$	Jmenovitá efektivní hodnota napětí na sekundárním vinutí transformátoru	(V)
$U_{AKU}$	Napětí akumulátoru	(V)
$U_C$	Výstupní napětí komparátoru	(V)
$U_{CC}$	Napájecí napětí	(V)
$U_H$	Vstupní napětí komparátoru při spodní komparační úrovni	(V)
$U_L$	Vstupní napětí komparátoru při horní komparační úrovni	(V)
$U_{OUT}$	Výstupní napětí komparátoru	(V)
$u_{\text{PRIM}}$	Okamžitá hodnota napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru (simulace)	(V)



$U_{REF}$	Referenční napětí komparátoru	(V)
$U_{SAT}$	Saturační napětí komparátoru	(V)
$u_{SEK}$	Okamžitá hodnota napětí na vinutí vyššího napětí transformátoru (simulace)	(V)
$U_{VYP}$	Spodní komparační úroveň	(V)
$u_Z$	Okamžitá hodnota napětí na zátěži vinutí vyššího napětí transformátoru	(V)
$U_Z$	Efektivní hodnota na zátěži vinutí vyššího napětí transformátoru	(V)
$U_{ZAP}$	Horní komparační úroveň	(V)
$U_{DS(BR)}$	Průrazné napětí drain – source tranzistoru	(V)
$U_{GS(th)}$	Prahové napětí gate – source tranzistoru	(V)
$U_{GS}$	Napětí gate – source tranzistoru	(V)
$U_{OL}$	Výstupní napětí budiče při nízké úrovni	(V)
$U_{OH}$	Výstupní napětí budiče při vysoké úrovni	(V)
$X_L$	Reaktance primárního vinutí transformátoru	( $\Omega$ )
$\eta$	Účinnost měniče	(%)
$\vartheta_a$	Teplota prostředí	(°C)
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot	(°C)

## Úvod

Tato bakalářská práce se bude zabývat měničem napětí, který je schopen vytvořit z napěťové hladiny 12 V stejnosměrných efektivní hodnotu napětí odpovídající napájecí síti, tedy 230 V střídavých. Cílem této práce je porovnat chování skutečného měniče se simulovaným měničem. Porovnání bude provedeno s ohledem na zatěžovací charakteristiky a účinnost měniče s rostoucím zatížením.

V teoretické části bude vytvořen přehled topologií měničů podle tvaru výstupního napětí. Tento přehled bude zaměřen především na výhody a nevýhody jednotlivých zapojení a budou nastíněny principy funkčnosti jednotlivých zapojení. Dále budou popsány součástky použité k realizaci měniče. Popis budiče s oscilátorem bude zaměřen na princip funkce a důležité parametry ovlivňující chod měniče. Bude navržen komparátor, pracující jako ochrana proti přílišnému vybití akumulátoru. Tento komparátor se postará o hlídání stavu napětí použitého akumulátoru a v případě nízkého napětí akumulátoru odpojí měnič. Poté budou popsány použité výkonové tranzistory a proveden návrh chladiče.

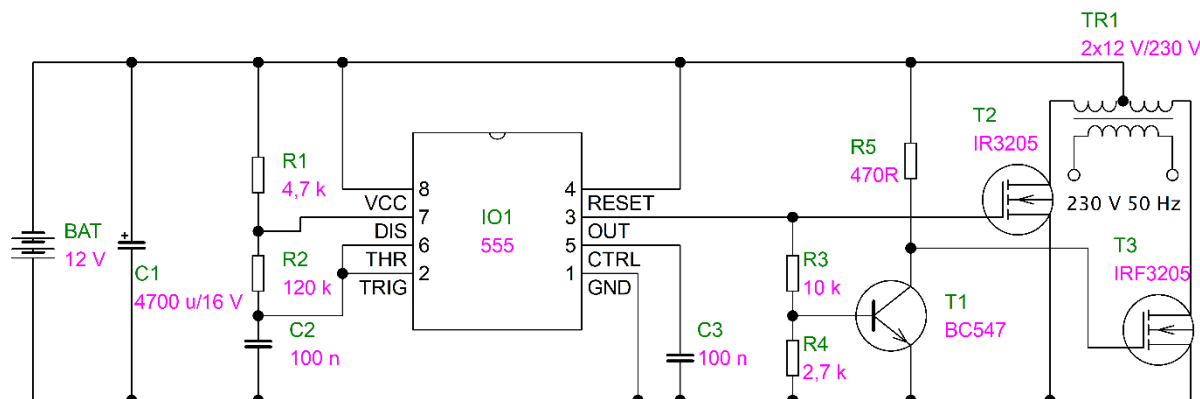
V praktické části bude měnič nasimulován v prostředí OrCAD/PSpice, aby bylo ověřeno předpokládané chování zapojení. Simulovány budou zatěžovací charakteristiky měniče a jeho účinnosti v závislosti na zatěžovacím proudu a také simulace převodní charakteristiky komparátoru. Nakonec dojde na návrh desek plošných spojů, oživení celého měniče a změření jeho charakteristik, a také změření převodní charakteristiku komparátoru.

Závěr bude zaměřen na srovnání výsledků získaných simulací a měřeními a bude navrženo případné vylepšení.

## 1 Popis existujících zapojení

Měnič 12 V DC / 230 V AC může být realizován více možnými způsoby, které se liší algoritmem spínání výkonových MOSFET tranzistorů nebo použitým transformátorem.

### 1.1 Zapojení s výstupním obdélníkovým signálem

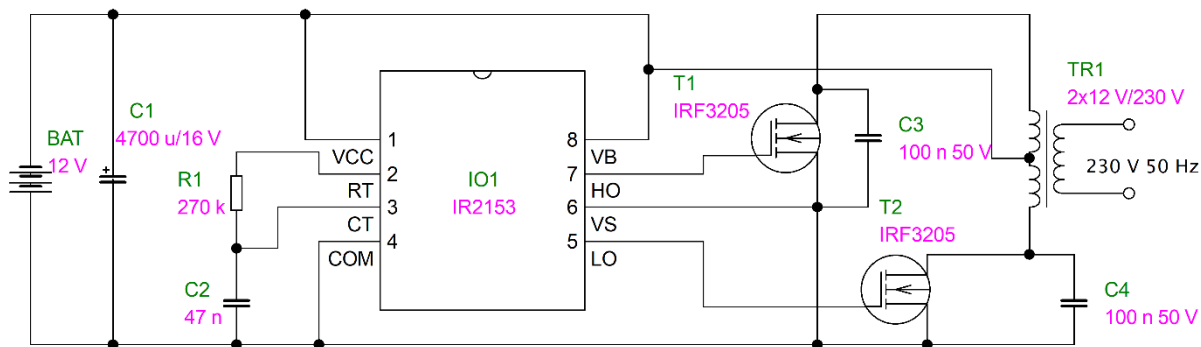


Obr. 1.1 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem 555



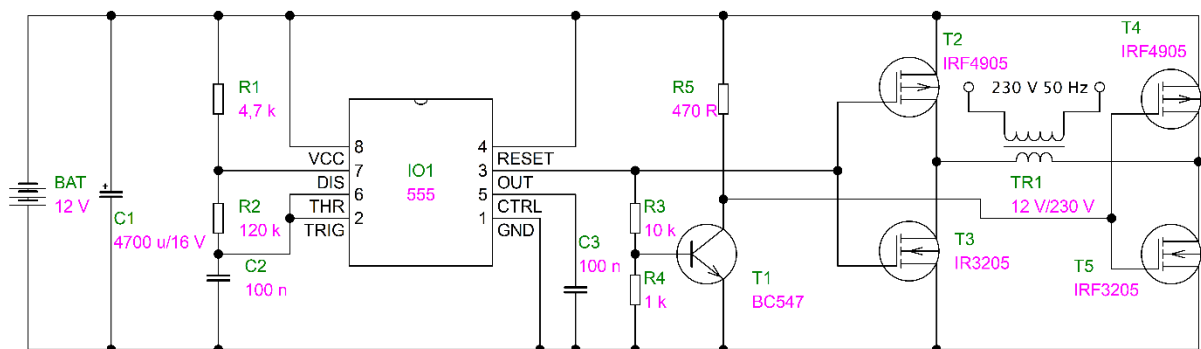
Obr. 1.2 Časový průběh výstupního napětí měniče s obdélníkovým signálem

U tohoto zapojení je použit jako zdroj spínacích pulsů pro výkonové tranzistory velmi známý obvod NE555. Frekvence oscilátoru se nastavuje pomocí velikosti odporu rezistoru  $R_2$  a kapacity kondenzátoru  $C_2$ . Na pinu 3 obvodu NE555 získáme obdélníkový signál, který je přiveden na řídicí elektrodu jednoho z výkonových MOSFET tranzistorů. Druhý MOSFET tranzistor je řízen napětím, které je invertováno bipolárním tranzistorem BC547 v zapojení se společným emitorem. V případě tohoto zapojení je potřeba použít transformátor se dvěma sekundárními vinutími. Transformátor i spínací tranzistory musí být samozřejmě přizpůsobeny výkonu měniče. (1)



Obr. 1.3 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem IR2153

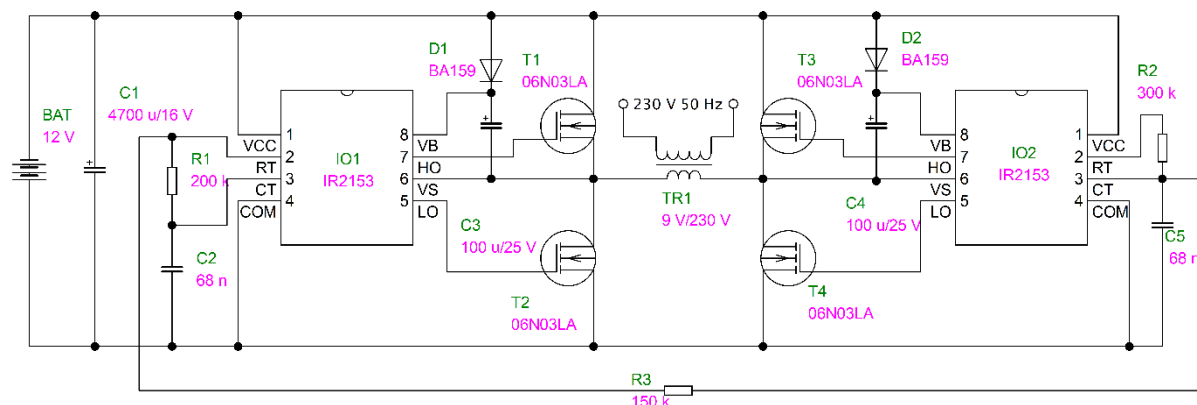
Zapojení s obvodem IR2153, které je velmi podobné jako provedení s obvodem NE555. Jediný rozdíl obvodu na Obr. 1.3 oproti zapojení na Obr. 1.4 spočívá ve spínání výkonových tranzistorů. Výstupy obvodu IR2153 jsou přizpůsobeny pro spínací tranzistory, na pinu 7 a 5 jsou signály vzájemně fázově posunuty o 180°, proto není potřeba invertoru spínacího signálu s bipolárním tranzistorem. Další výhodou je deadtime (ochranná doba) mezi spínáním jednotlivých tranzistorů, to znamená, že nesepnou oba tranzistory v jedné větvi najednou a nemůže dojít ke tvrdému zkratu zdroje. (2)



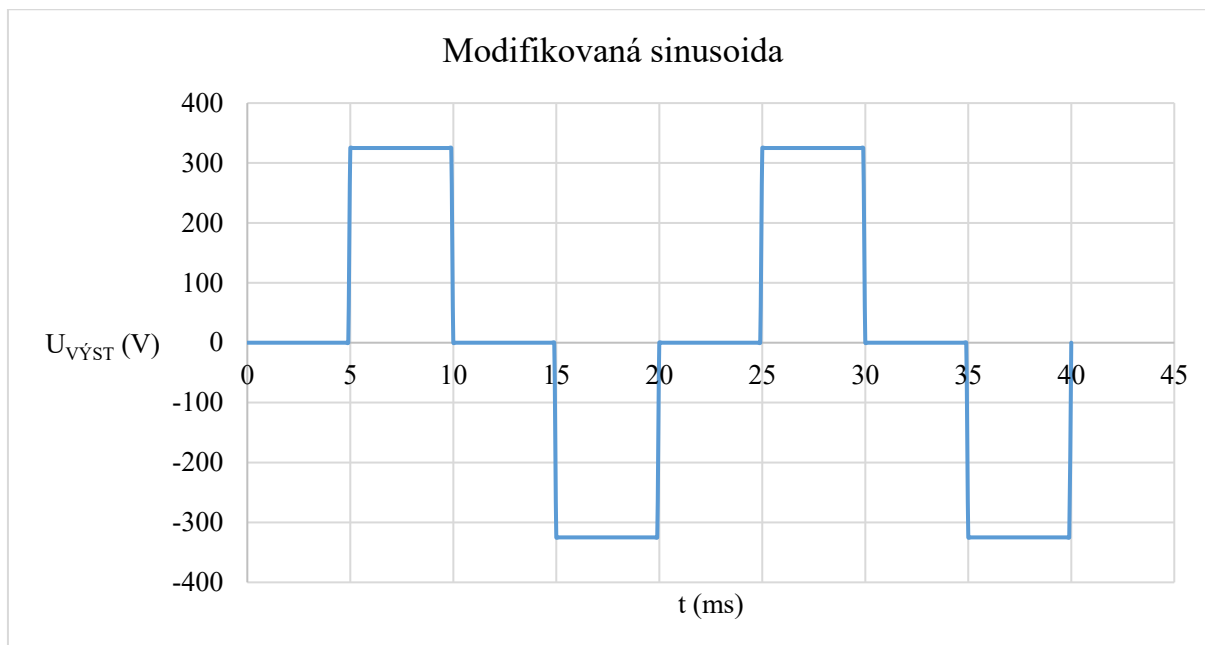
Obr. 1.4 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem 555, transformátor s jedním sekundárním vinutím

Modifikace zapojení z Obr. 1.3 byla navržena z důvodu malé dostupnosti transformátorů se dvěma sekundárními vinutími. V tomto zapojení je potřeba sice použít čtyři výkonové tranzistory, ale vystačíme si s transformátorem s jedním sekundárním vinutím, který bývá běžně k dostání.

## 1.2 Zapojení s výstupním modifikovaným sinusovým signálem

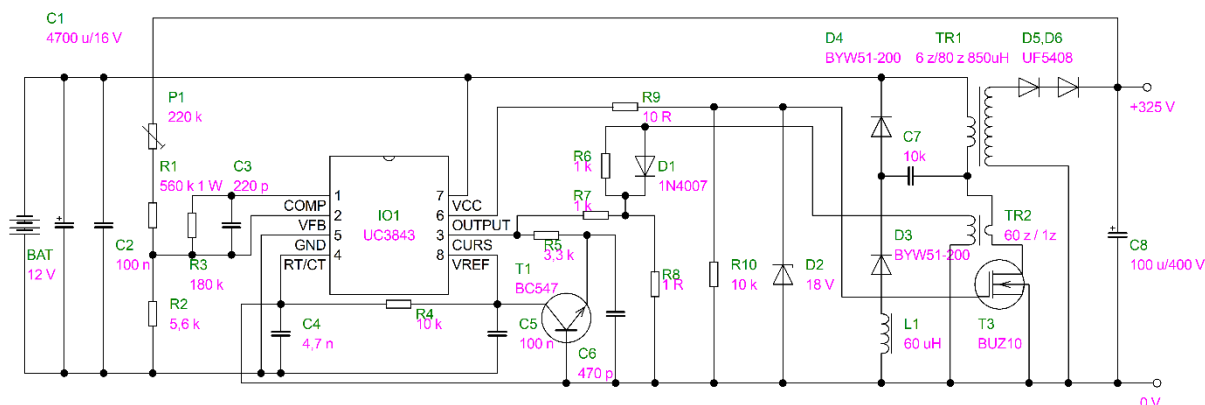


Obr. 1.5 Schéma zapojení měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem

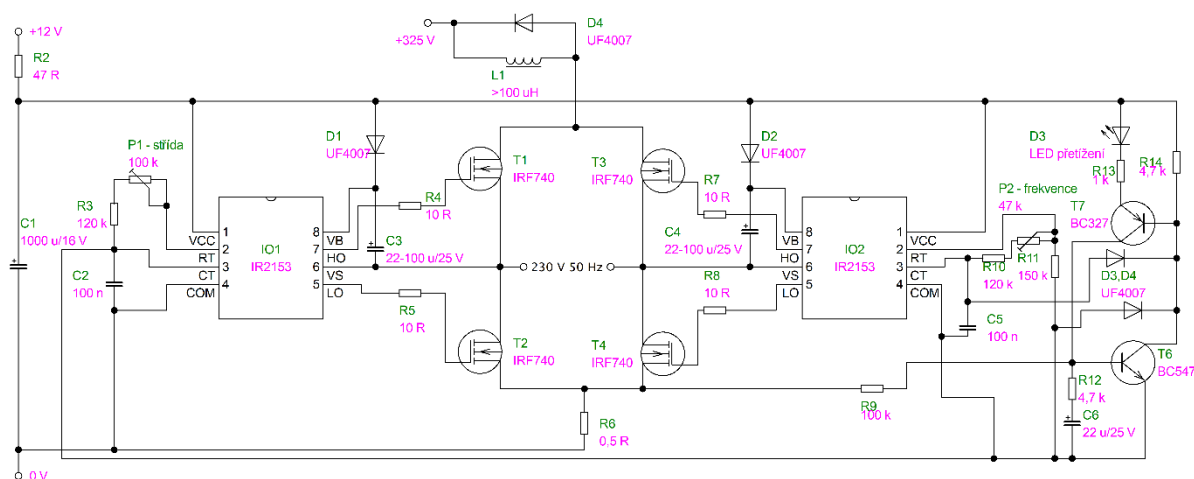


Obr. 1.6 Časový průběh výstupního napětí pro měnič s modifikovaným sinusovým signálem

Měnič s výstupním modifikovaným sinusovým signálem má oproti předchozímu s výstupním obdélníkovým signálem více výhod. U obdélníkového signálu neodpovídá amplituda výstupního napětí amplitudě síťového napětí, místo 325 V je pouze 230 V, a to může způsobovat problémy při napájení spotřebičů, které mají na vstupu usměrňovač. Hodnota usměrněného napětí bude v tomto případě přibližně o 30% nižší než hodnota usměrněného síťového napětí a může dojít k nesprávné funkci spotřebiče. Z důvodu, že měniče s výstupním sinusovým signálem jsou poměrně složité, tak je volen kompromis v podobě modifikovaného sinusového signálu. Amplituda a efektivní hodnota je u modifikované sinusovky stejná jako u síťového napětí, a proto také bývá nejčastěji používanou variantou pro velkou většinu vyráběných měničů. (3)



Obr. 1.7 Schéma zapojení spínaného měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem, část DC / DC měnič



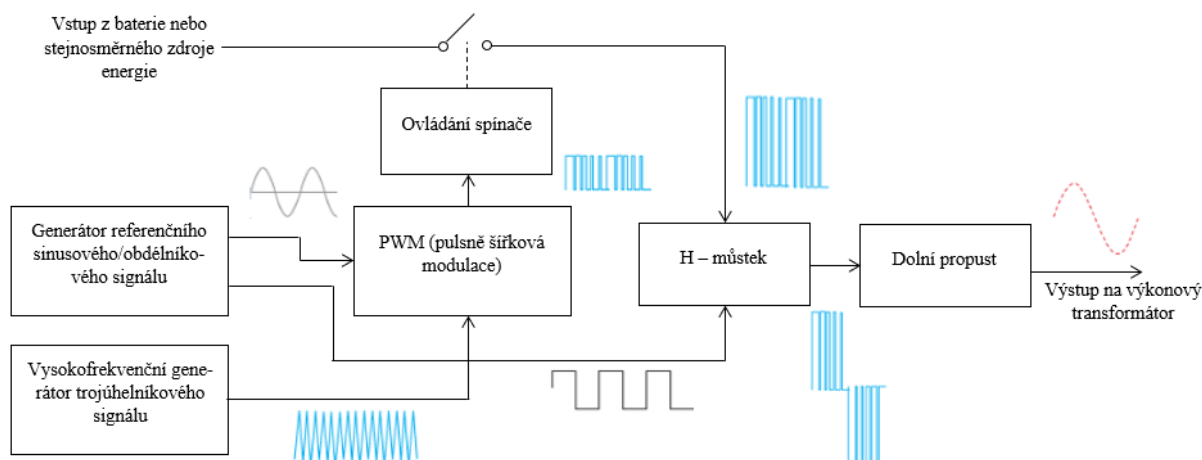
Obr. 1.8 Schéma zapojení spínaného měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem, část DC / AC měnič

Na Obr. 1.7 a Obr. 1.8 jsou zobrazena schémata částí spínaného měniče s výstupní modifikovanou sinusoidou. Výhodou tohoto měniče je absence transformátoru, který bývá při frekvenci 50 Hz a vyšších výkonech zpravidla těžký i prostorově objemný. Dochází tak ke zvýšení nároků na velikost šasi, ve kterém má být obvod umístěn a také se zvětšuje hmotnost měniče. Měnič má také z důvodu absence transformátoru dobrou účinnost, která dosahuje až 90 %. (4)

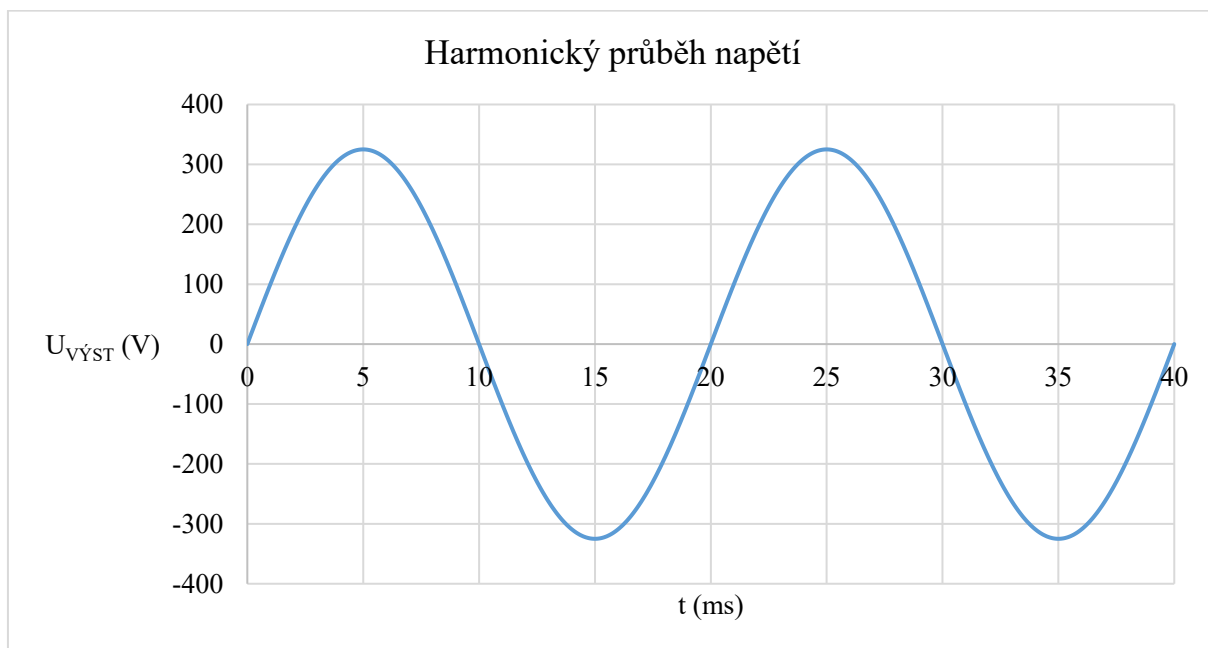
Obvod se skládá ze dvou částí:

- 1) DC / DC měnič – přivedené napětí 12 V je převedeno zvyšujícím měničem na napětí o velikosti 325 V, přibližně odpovídající amplitudě síťového napětí
- 2) DC / AC měnič – stejnosměrné napětí z DC/DC měniče je pomocí vhodného spínání výkonových tranzistorů převedeno na střídavé napětí o efektivní hodnotě 230 V

### 1.3 Zapojení s výstupním harmonickým signálem



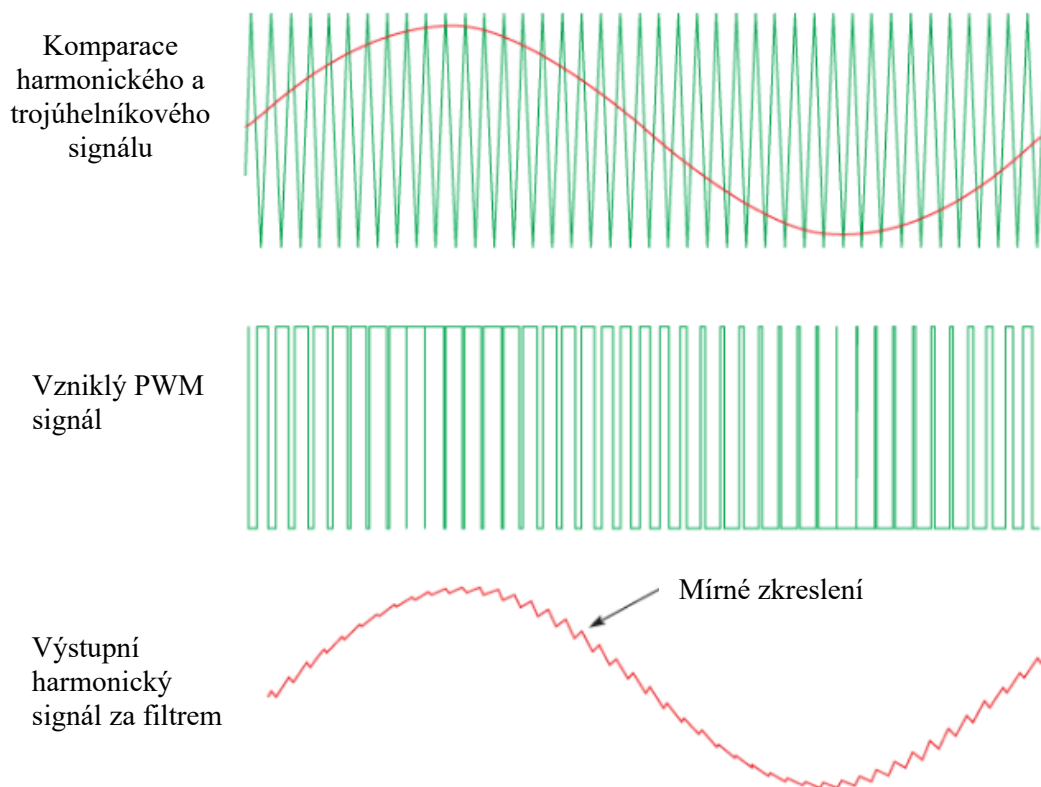
Obr. 1.9 Blokové schéma měniče s výstupním harmonickým napětím (6)



Obr. 1.10 Časový průběh výstupního napětí pro měnič s harmonickým signálem

Měnič s výstupním harmonickým signálem je ze všech prezentovaných nejsložitější. K řízení tohoto měniče se používá pulsně-šířková modulace (PWM). Harmonický signál z referenčního zdroje, kterým bývá nejčastěji mikrokontroler, je porovnáván s vysokofrekvenčním trojúhelníkovým signálem. Signál, vzniklý tímto porovnáním, řídí spínač a má obdélkový průběh s proměnnou střídou. Signál vstupující do H-můstku má stejný tvar jako řídicí signál vzniklý komparací, ovšem jeho výkonové parametry jsou jiné. Pomocí H-můstku se vhodným spínáním tranzistorů referenčním obdélkovým napětím vytvoří střídavý PWM signál, který je následně vyfiltrován dolní propustí a veden dále na transformátor. Obr. 1.11 ukazuje princip vzniku PWM signálu komparací nízkofrekvenčního

harmonického a vysokofrekvenčního trojúhelníkového signálu. Zvýšením frekvence trojúhelníka můžeme snížit zkreslení výsledného sinusového signálu.



Obr. 1.11 Princip vzniku obdélníkového PWM signálu a harmonický signál vzniklý po filtraci (6)



## 2 Výběr zapojení

Po prozkoumání možných zapojení uvedených v kapitole 1 byl vybrán pro realizaci měnič s výstupním průběhem v podobě modifikované sinusovky z kapitoly 1.2. Jedná se o kompromis mezi měničem s výstupním obdélníkovým signálem a měničem s výstupním harmonickým signálem. Měnič, který bude konstruován, nebude sloužit k napájení motorů nebo zařízení s indukčnostmi, citlivých na tvar vstupního napětí. Bude použit výhradně k napájení spotřebičů, které mají na vstupu usměrňovač, a proto jim modifikovaný sinus vadit nebude. Další výhodou je, že v zapojení nebude potřeba použít mikrokontrolér, ale postačí použití integrovaného obvodu.

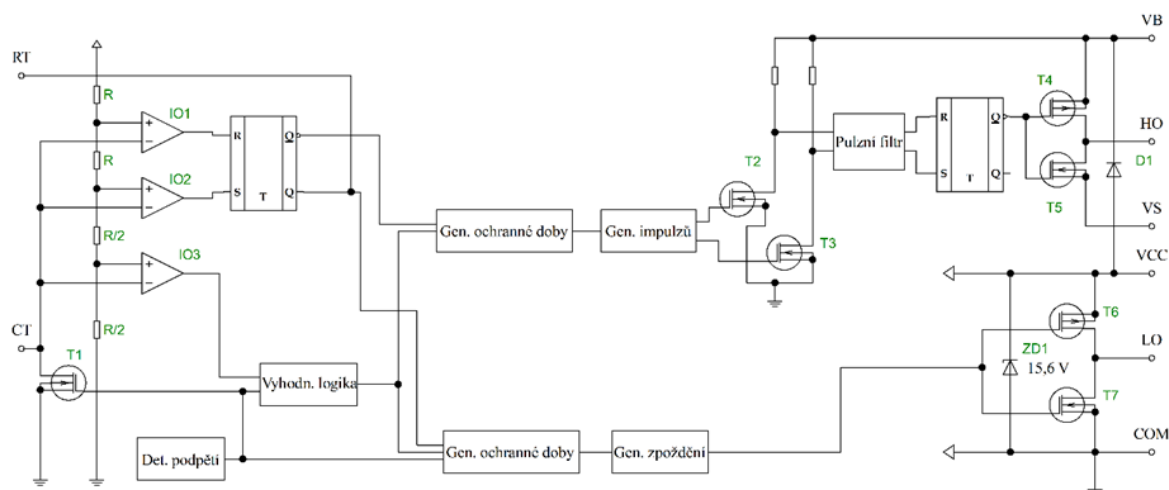
Zařízení, která můžeme k měniči připojit, jsou omezena výstupním výkonem, který je měnič schopen dodat. Tento výkon je dán jak spínacími tranzistory, tak použitým transformátorem.

V této práci bude maximální zdánlivý výkon měniče 160 VA. Nejvíce limitujícím prvkem je v tomto případě transformátor. K měniči bude možno připojit spotřebiče, kterými jsou adaptér od notebooku, mobilního telefon, holicí strojek nebo zesilovač pro elektrickou kytaru. Využití může nalézt při cestě autem na dovolenou nebo jako zdroj síťového napětí v místech, kde není trvale dostupná elektrická energie, jako na chatách.

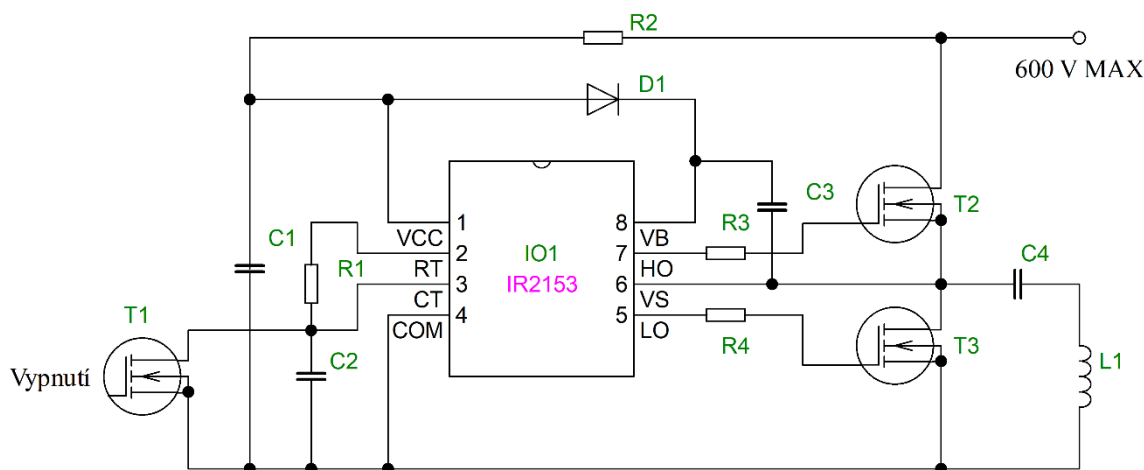
### 3 Výběr součástek a jejich dimenzování

#### 3.1 Integrovaný obvod IR2153

Základem vybraného zapojení je řídicí obvod IR2153. Tento obvod spojuje budič dvou IGBT nebo MOSFET tranzistorů a oscilátor pro generování spínacích pulsů řízených tranzistorů. Oscilátor obsažený v tomto obvodu je velmi podobný oscilátoru obsaženému v obvodu NE555.



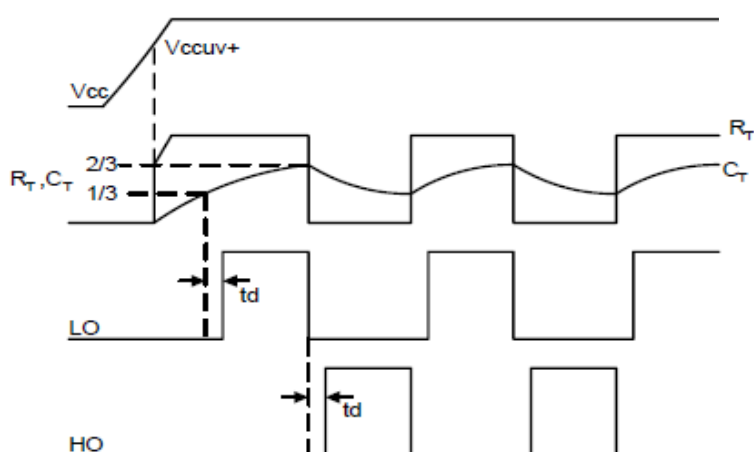
Obr. 3.1 Vnitřní schéma zapojení obvodu IR2153



Obr. 3.2 Schéma zapojení doporučené výrobcem pro obvod IR2153 (8)

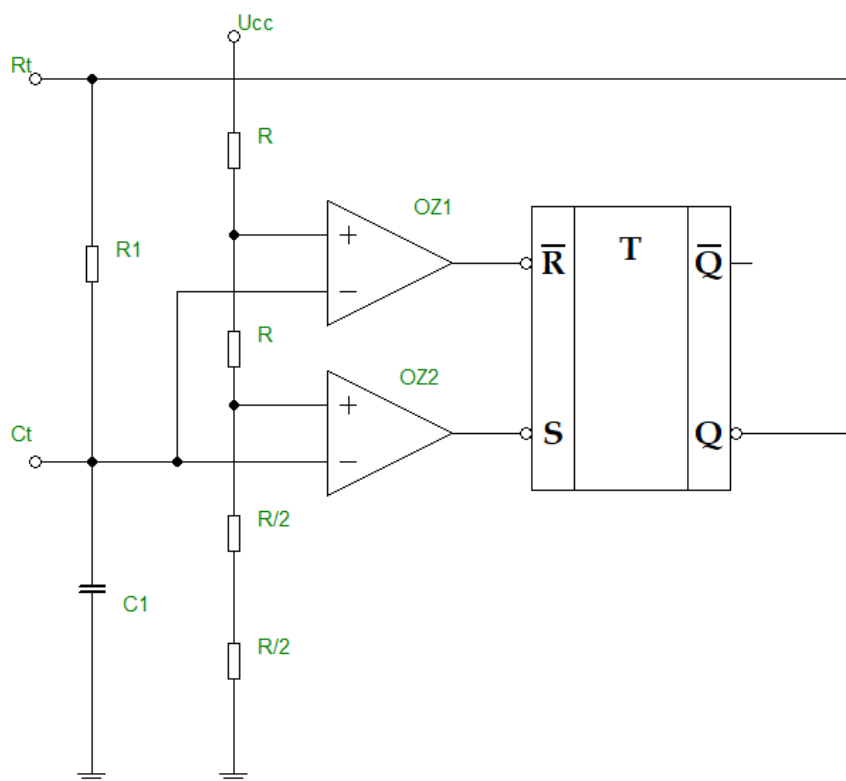
Mezi vývody  $R_T$  a  $C_T$  se připojuje časovací rezistor a mezi vývod  $C_T$  a nulový potenciál se připojuje časovací kondenzátor. Parametry těchto dvou součástek určují výstupní frekvenci oscilátoru podle vztahu (3.1). Číslo 75 v této rovnici symbolizuje odpor výstupního pinu oscilátoru, střída výstupního signálu je teoreticky 50 %. Ve skutečnosti je tento poměr střidy těžce dosažitelný a téměř vždy se objevuje odchylka, jak je uvedeno v Tab. 3.1.

$$f_{\text{VYST}} = \frac{1}{1.38 \cdot (R_1 + 75) \cdot C_1} \quad (3.1)$$



Obr. 3.3 Průběhy napájecího napětí a napětí na vstupech a výstupech obvodu (8)

Na Obr. 3.3 jsou zobrazeny průběhy napětí mezi vstupními, popř. výstupními piny a signálovou zemí při jeho činnosti. V okamžiku připojení napájecího napětí je časovací kondenzátor  $C_1$  vybitý a napětí na invertujících vstupech operačních zesilovačů jsou nulová. Napětí na neinvertujících vstupech jsou dána odporovým děličem napájecího napětí, na všech výstupech operačních zesilovačů je tedy kladné napětí odpovídající logické jedničce. Jelikož vstup R klopného obvodu RS je aktivní v logické nule, nemá na něj kladné napětí vliv. Klopný obvod je tedy sepnut logickou jedničkou na vstupu S. Tím začne protékat proud do pinu  $R_T$  a přes rezistor  $R_1$  je nabíjen kondenzátor  $C_1$ . Jakmile napětí na kondenzátoru dosáhne  $1/3$  napájecího napětí  $U_{CC}$ , je přepnut výstup komparátoru OZ2 na logickou nulu, nyní se RS obvod nachází stále ve stejném stavu a kondenzátor se stále nabíjí. Po dosažení  $2/3$  napájecího napětí  $U_{CC}$  na kondenzátoru se překlápí výstup komparátoru OZ1 na logickou nulu a klopný obvod je přepnut do druhého stavu, což má za následek vybíjení kondenzátoru přes rezistor  $R_1$ . Při poklesu napětí pod  $2/3 \cdot U_{CC}$  se komparátor OZ1 vrátí do logické jedničky na výstupu, při poklesu pod  $1/3 \cdot U_{CC}$  se překlápí OZ2, následuje opětovné nabíjení kondenzátoru  $C_1$  a celý děj se opakuje. (5)



Obr. 3.4 Schéma oscilátoru na vstupní straně obvodu IR2153

Výstupní signály z klopného obvodu RS jsou dále vedeny na generátory ochranné doby, zesíleny koncovými stupni tvořenými MOSFET tranzistory a vyvedeny na výstupní piny HO a LO. V pouzdru obvodu je integrována Zenerova dioda, která se při napětí  $U_{CC} > 15,6$  V otevře, a přeruší tak napájení obvodu, aby nedošlo k jeho poškození. Obvod je také vybaven detektorem podpětí, který zablokuje funkci oscilátoru při poklesu napájecího napětí pod 9 V.

Tab. 3.1 Důležité parametry obvodu IR2153

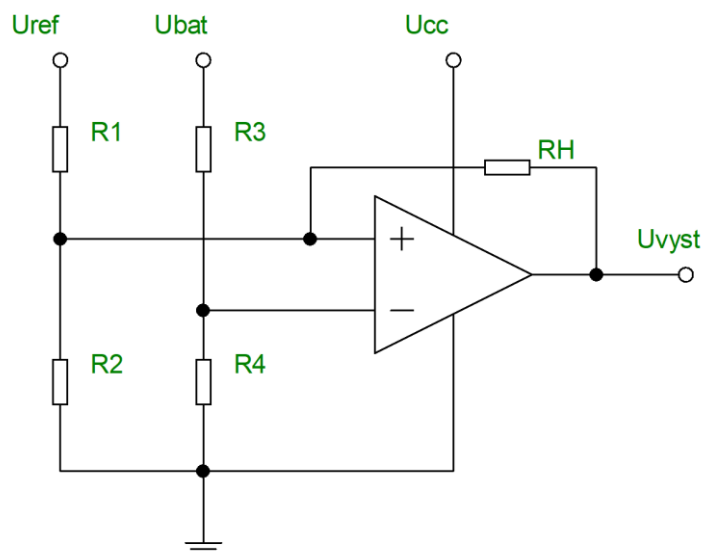
Veličina	Definice	Minimální	Typická	Maximální	Jednotka
$U_{OH}$	Vysoká úroveň výstupního napětí	-	10-15	-	V
$U_{OL}$	Nízká úroveň výstupního napětí	-	0	-	
d	Střída výstupního signálu	48	50	52	%
$t_r$	Doba náběhu výstupního napětí	-	120	220	ns
$t_f$	Doba poklesu výstupního napětí	-	50	80	
$t_{SD}$	Zpoždění při vypnutí	-	350	-	
$t_d$	Ochranná doba mezi výstupními pulzy	0,65	1,1	1,75	$\mu$ s
$I_{O+}$	Výstupní proud budiče (log.1)	-	180	-	mA
$I_{O-}$	Výstupní proud budiče (log.0)	-	260	-	

### 3.2 Návrh komparátoru pro odpojení akumulátoru

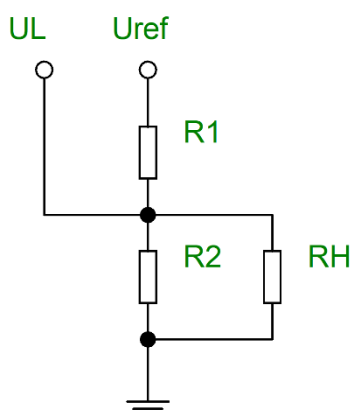
Jak bylo zmíněno výše, samotný obvod IR2153 má ochranu proti podpětí a vypne se při poklesu napětí pod 9 V. Ovšem při tomto napětí bude olověný akumulátor úplně vybitý a nebude jej zřejmě možné už žádným způsobem oživit, proto je potřeba navrhnout ochranu proti hlubokému vybití. Za vybitý se akumulátor považuje při poklesu napětí na 1,75 V na článek, to znamená při napětí

akumulátoru rovno 10,6 V. Navržená ochrana obvod zablokuje již o něco dříve, a to při napětí 10,8 V. Opětovné zapnutí bude možné až po připojení akumulátoru s napětím 12 V a vyšším, tím je zajištěna ochrana proti opětovnému připojení již téměř vybitého akumulátoru. Vypnutí obvodu je zajištěno připojením MOSFET tranzistoru s N-kanálem paralelně k časovacímu kondenzátoru  $C_1$ . Při napětí nižším než 10,8 V, komparátor sepne tento tranzistor, a ten připojí pin  $C_T$  na signálovou zem.

Návrh tohoto komparátoru je proveden podle příručky k návrhu invertujícího komparátoru s hysterezí od firmy Texas Instruments (11).



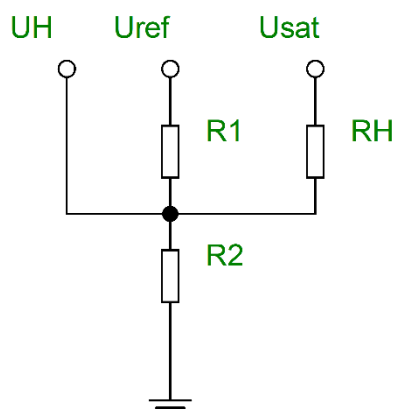
Obr. 3.5 Schéma zapojení obvodu komparátoru pro ochranu akumulátoru před vybitím



Obr. 3.6 Náhradní schéma obvodu komparátoru při napětí nižším než  $U_{VYP}$

Rovnice komparátoru při napětí nižším než  $U_{VYP}$ :

$$\frac{U_{SAT} - U_H}{R_H} + \frac{U_{REF}}{R_1} = \frac{U_H}{R_2} \quad (3.2)$$

Obr. 3.7 Náhradní schéma obvodu komparátoru při napětí vyšším než  $U_{ZAP}$ 

Rovnice komparátoru při napětí vyšším než  $U_{ZAP}$ :

$$\frac{U_{REF} - U_L}{R_1} = \frac{U_L}{R_H} + \frac{U_L}{R_2} \quad (3.3)$$

Zvolené hodnoty pro výpočet komparátoru:

$$\begin{aligned} R_2 &= 150 \text{ k}\Omega \\ U_{CC} &= 5 \text{ V} \\ U_{VYP} &= 10,8 \text{ V} \\ U_{ZAP} &= 12 \text{ V} \\ U_{REF} &= 5 \text{ V} \\ U_{SAT} &= 4,3 \text{ V} \end{aligned}$$

Přepočet zapínacího a vypínacího napětí za děličem:

$$U_L = \frac{U_{VYP}}{3} = \frac{10,8}{3} = 3,6 \text{ V} \quad (3.4)$$

$$U_H = \frac{U_{ZAP}}{3} = \frac{12}{3} = 4 \text{ V} \quad (3.5)$$

Výpočet hysterezního odporu  $R_H$ :

$$\begin{aligned} R_H &= \frac{R_2 \cdot (U_{SAT} \cdot (U_{REF} - U_L) - U_{REF} \cdot (U_H - U_L))}{U_{REF} \cdot (U_H - U_L)} \\ &= \frac{150 \cdot 10^{-3} \cdot (4,3 \cdot (5 - 3,6) - 5 \cdot (4 - 3,6))}{5 \cdot (4 - 3,6)} \\ &= 301,5 \text{ k}\Omega \end{aligned} \quad (3.6)$$

Podle řady E24 byla zvolena nejbližší hodnota  $R_H = 300 \text{ k}\Omega$

Výpočet odporu  $R_1$ :

$$R_1 = \frac{R_2 \cdot R_H \cdot (U_{REF} - U_L)}{U_L \cdot (R_2 + R_H)} = \frac{150 \cdot 10^3 \cdot 301,5 \cdot 10^3 \cdot (5 - 3,6)}{3,6 \cdot (150 \cdot 10^3 + 301,5 \cdot 10^3)} \quad (3.7)$$

$$= 38,95 \text{ k}\Omega$$

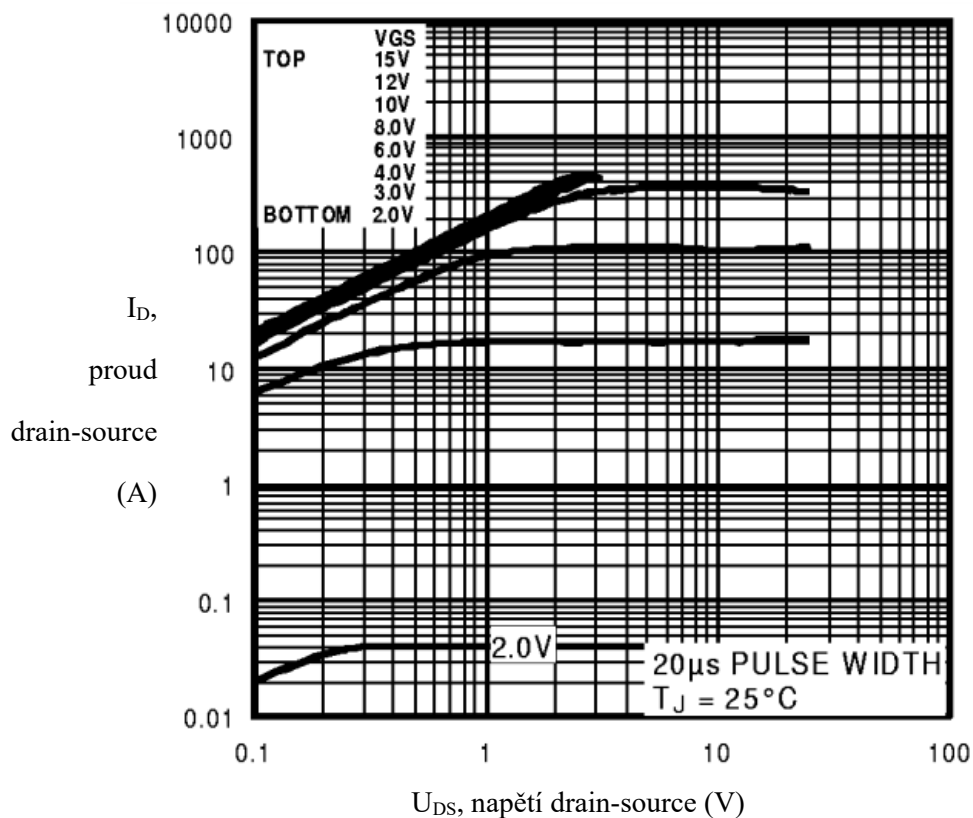
Podle řady E24 byla zvolena nejbližší hodnota  $R_1 = 39 \text{ k}\Omega$

### 3.3 Výběr spínacích tranzistorů

Jako spínací prvek bude použit MOSFET tranzistor s N-kanálem s označením IRL3803. Tento tranzistor byl vybrán hlavně z důvodu jeho nízkého odporu kanálu v sepnutém stavu  $R_{DS(ON)}$ . Nízký odpor v sepnutém stavu je žádoucí z důvodu minimalizace ztrát. Tranzistor je také vybaven rychlou zpětnou diodou mezi drainem a sourcem.

Tab. 3.2 Důležité parametry MOSFET tranzistoru IRL3803

Veličina	Definice	Hodnota	Jednotka
$I_D$	Nepřetržitý proud drainem	140	A
$U_{GS}$	Napětí gate – source	$\pm 16$	V
$U_{GS(th)}$	Prahové napětí gate – source	1,0	V
$P_D$	Ztrátový výkon	200	W
$U_{DS(BR)}$	Průrazné napětí drain – source	30	V
$R_{DS(ON)}$	Odpor kanálu v sepnutém stavu	0,006	$\Omega$
$C_{ISS}$	Vstupní kapacita	5000	pF
$t_{d(on)}$	Doba zpoždění při zapínání	14	ns
$t_{on}$	Doba zapnutí	230	
$t_{d(off)}$	Doba zpoždění při vypínání	29	
$t_{off}$	Doba vypnutí	35	
$T_{j(max)}$	Maximální teplota přechodu	175	$^{\circ}\text{C}$



Obr. 3.8 Výstupní charakteristiky MOSFET tranzistoru IRL3803 (7)

### 3.4 Návrh chladičů pro výkonové tranzistory

Použité spínací tranzistory je potřeba chladit, aby nedošlo k jejich přehřátí a zničení. Jak je patrné z Tab. 3.2, použitý tranzistor má velkou maximální dovolenou teplotu přechodu, je ovšem žádoucí, aby této teploty nebylo dosaženo. S rostoucí teplotou dochází ke zhoršení dynamických, ale i izolačních vlastností. Pro návrh chladiče je potřeba také znát střední hodnotu ztrátového výkonu na jednom tranzistoru. Výpočet ztrátového výkonu v této kapitole je proveden teoreticky a doložen průběhy ze simulačního softwaru.

Tab. 3.3 Vstupní hodnoty pro výpočet chladiče

Veličina	Definice	Hodnota	Jednotka
$I_{N(RMS)}$	Jmenovitý efektivní proud procházející tranzistorem	17,77	A
k	Koeficient přetížitelnosti	1,2	-
$R_{(DSON)}$	Odpor kanálu tranzistoru v sepnutém stavu	0,006	$\Omega$
$R_{\theta JC}$	Tepelný odpor mezi přechodem a pouzdem	0,75	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$R_{\theta CS}$	Tepelný odpor mezi pouzdem a chladičem	0,5	$^{\circ}\text{C}/\text{W}$
$\vartheta_{J(max)}$	Maximální teplota přechodu	175	$^{\circ}\text{C}$
$\vartheta_a$	Teplota prostředí	40	$^{\circ}\text{C}$



Měnič bude možné krátkodobě přetížit, proto bude chladič dimenzován na proud o něco větší, než je jmenovitý proud transformátoru. A z tohoto důvodu se ve vstupních hodnotách objevuje koeficient přetížitelnosti  $k$ .

Výpočet střední hodnoty ztrátového výkonu na jednom tranzistoru  $P_{F(AV)}$ :

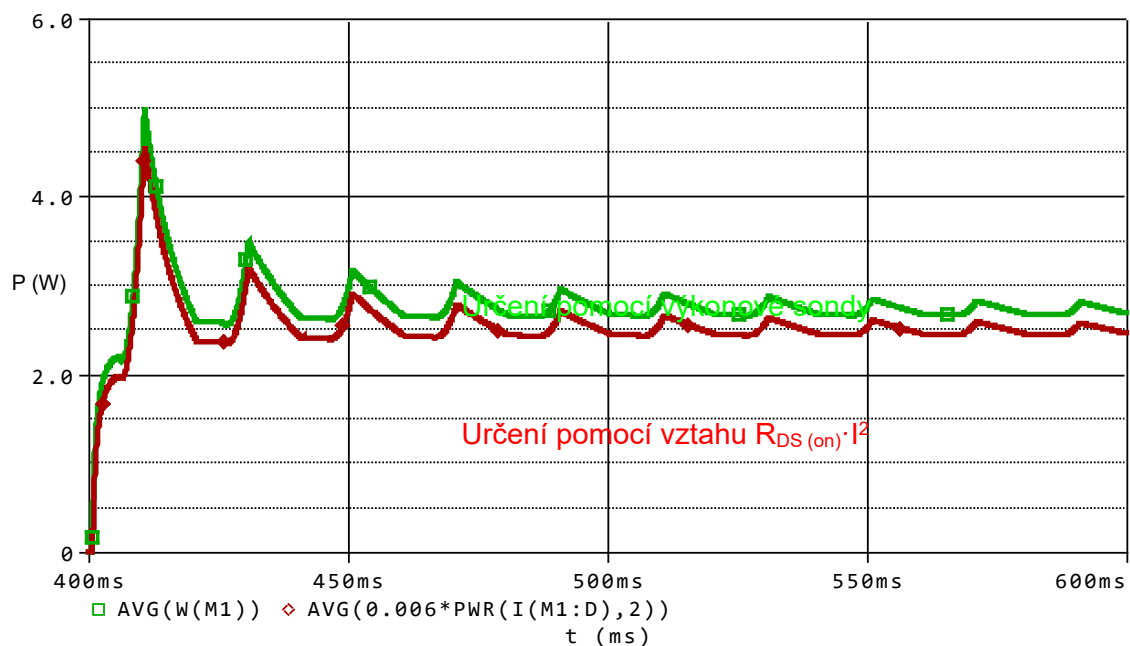
$$\begin{aligned} P_{F(AV)} &= R_{DS(ON)} \cdot (k \cdot I_{N(RMS)})^2 = 0,006 \cdot (1,2 \cdot 17,77)^2 \\ &= 0,006 \cdot 21,324^2 = 2,73 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.8)$$

Výpočet tepelného odporu chladiče  $R_{\theta SA}$ :

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{j(max)} - \vartheta_a = P_{F(AV)} \cdot (R_{\theta jc} + R_{\theta cs} + R_{\theta sa}) \quad (3.9)$$

$$\begin{aligned} R_{\theta SA} &= \frac{\vartheta_{j(max)} - \vartheta_a}{P_{F(AV)}} - R_{\theta jc} - R_{\theta cs} = \frac{175 - 40}{2,73} - 0,75 - 0,5 \\ &= 48,2 \text{ } ^\circ\text{C/W} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Pro chlazení tranzistorů je možno použít chladič s vypočteným nebo menším tepelným odporem, aniž by se tranzistor ohřál více než na maximální dovolenou teplotu.



Obr. 3.9 Určení ztrátového výkonu jednoho tranzistoru pomocí softwaru OrCAD/PSpice

Na Obr. 3.9 je zobrazeno určení ztrátového výkonu při stejné efektivní hodnotě proudu, která je zadána v rovnici (3.8). Ztrátový výkon v simulaci byl určen dvěma metodami. Červený průběh zobrazuje průběh ztrátového výkonu určeného pomocí efektivní hodnoty proudu a odporu tranzistoru v sepnutém stavu. Zelený průběh zobrazuje ztrátový výkon určený pomocí výkonové sondy.

### 3.5 Výběr transformátoru

Pro realizaci praktického zapojení bude použit toroidní transformátor od výrobce INDEL. Toroidní transformátor má oproti klasickému transformátoru z EI plechů menší rozměry, vyšší sycení jádra a

vyšší účinnost. Použitý transformátor má také určité nevýhody, jimiž jsou velký záběrný proud a komplikovanější montáž. Jelikož na trhu nejsou dostupné zvyšující transformátory v napětových hladinách, které jsou v tomto případě využívány, je výhodnější použít opačně zapojený snižující transformátor. Parametry transformátoru jsou uvedeny v Tab. 3.4.

Tab. 3.4 Důležité parametry transformátoru (9)

Veličina	Definice	Hodnota	Jednotka
$S_N$	Jmenovitý zdánlivý výkon	160	VA
$U_{1N}$	Jmenovité napětí na primárním vinutí	230	V
$U_{2N}$	Jmenovité napětí na sekundárním vinutí	9	V
$I_{2N}$	Jmenovitý proud sekundárním vinutím	17,77	A
-	Tepelná třída	Ta40B	-

## 4 Simulační ověření vybraného zapojení

Simulace je provedena pomocí softwaru od firmy Cadence, OrCAD pro nakreslení schémat a PSpice pro simulaci chování obvodu.

### 4.1 Simulace měniče v programu OrCAD/PSpice

Jelikož nemáme k dispozici simulační model pro vybraný obvod IR2153, bude v simulaci řídicí část měniče reprezentována čtyřmi pulzními zdroji. Tyto zdroje budou spínat tranzistory ve výkonové části měniče.

Pro simulaci je potřeba určit parametry transformátoru, jako indukčnost vinutí nižšího a vyššího napětí, jmenovitý odpor zátěže, proudy tekoucí oběma vinutími.

Transformátor měniče je simulován pomocí dvou indukčností a jejich vzájemné vazby. (10)

Výpočet efektivní hodnoty napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru při napětí akumulátoru  $U_{AKU} = 12 \text{ V}$ :

$$\begin{aligned}
 U_{1ef} &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T u^2(t) \cdot dt} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \left( \int_0^{T/4} U_{AKU}^2 \cdot dt + \int_{T/4}^{T/2} 0^2 \cdot dt + \int_{T/2}^{3T/4} U_{AKU}^2 \cdot dt + \int_{3T/4}^T 0^2 \cdot dt \right)} \\
 &= \sqrt{\frac{1}{0,020} \cdot \left( \int_0^{0,005} 12^2 \cdot dt + \int_{0,005}^{0,010} 0^2 \cdot dt + \int_{0,010}^{0,015} 12^2 \cdot dt + \int_{0,015}^{0,020} 0^2 \cdot dt \right)} \\
 &= \sqrt{72} = 8,48 \text{ V} \approx 8,5 \text{ V}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Tab. 4.1 Vstupní hodnoty pro výpočet parametrů transformátoru pro simulaci

Veličina	Definice	Hodnota	Jednotka
$S_N$	Zdánlivý výkon transformátoru	160	VA
$U_{1ef}$	Efektivní napětí na vinutí nižšího napětí	8,5	V
$U_{2ef}$	Efektivní napětí na vinutí vyššího napětí	235	V
$f$	Frekvence	50	Hz

Efektivní proud protékající vinutím nižšího napětí:

$$I_{1ef} = \frac{S}{U_{1ef}} = \frac{160}{8,5} = 18,82 \text{ A} \tag{4.2}$$

Efektivní proud protékající vinutím vyššího napětí:

$$I_{2ef} = \frac{S}{U_{2ef}} = \frac{160}{235} = 0,68 \text{ A} \tag{4.3}$$

Reaktance vinutí nižšího napětí:

$$X_L = \frac{S}{I_{1ef}^2} = \frac{160}{18,82^2} = 0,451 \, \Omega \quad (4.4)$$

Jmenovitý odpor zátěže vinutí vyššího napětí:

$$R_{2N} = \frac{S}{I_{2ef}^2} = \frac{160}{0,68^2} = 346 \, \Omega \quad (4.5)$$

Indukčnost vinutí nižšího napětí:

$$L_1 = \frac{1000 \cdot X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{1000 \cdot 0,451}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,44 \, \text{mH} \quad (4.6)$$

Indukčnost vinutí vyššího napětí:

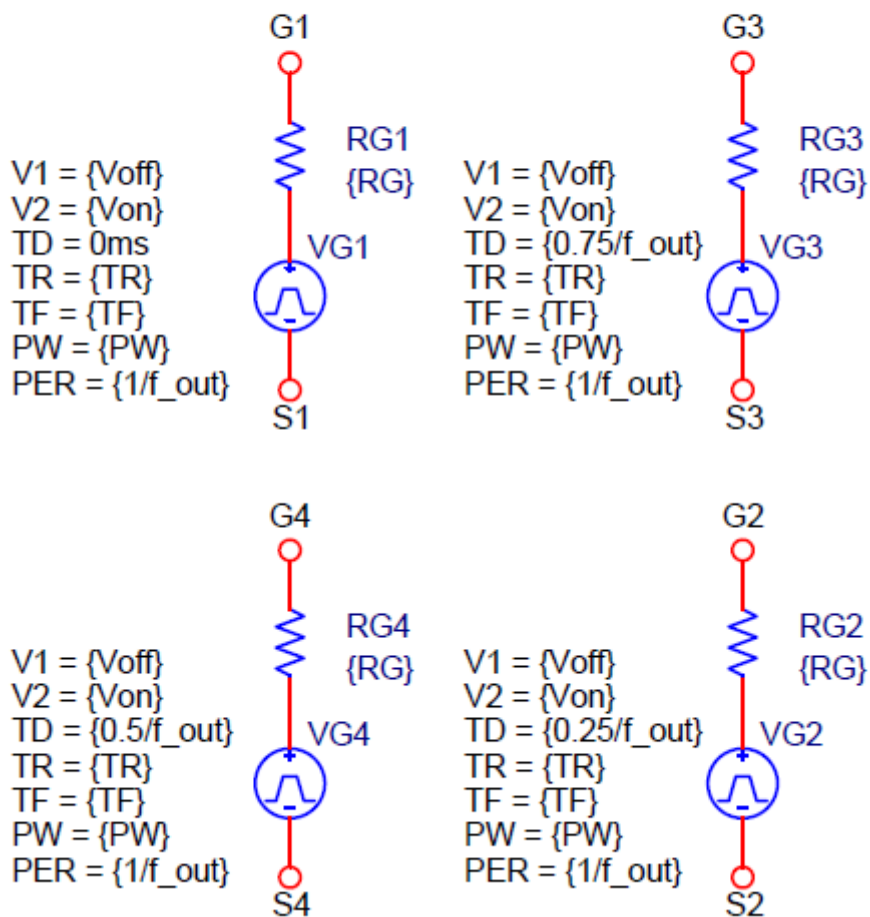
$$L_2 = \frac{L_1}{\left(\frac{U_{1ef}}{U_{2ef}}\right)^2} = \frac{1,44}{\left(\frac{8,5}{235}\right)^2} = 1100,7 \, \text{mH} \quad (4.7)$$

PARAMETERS:

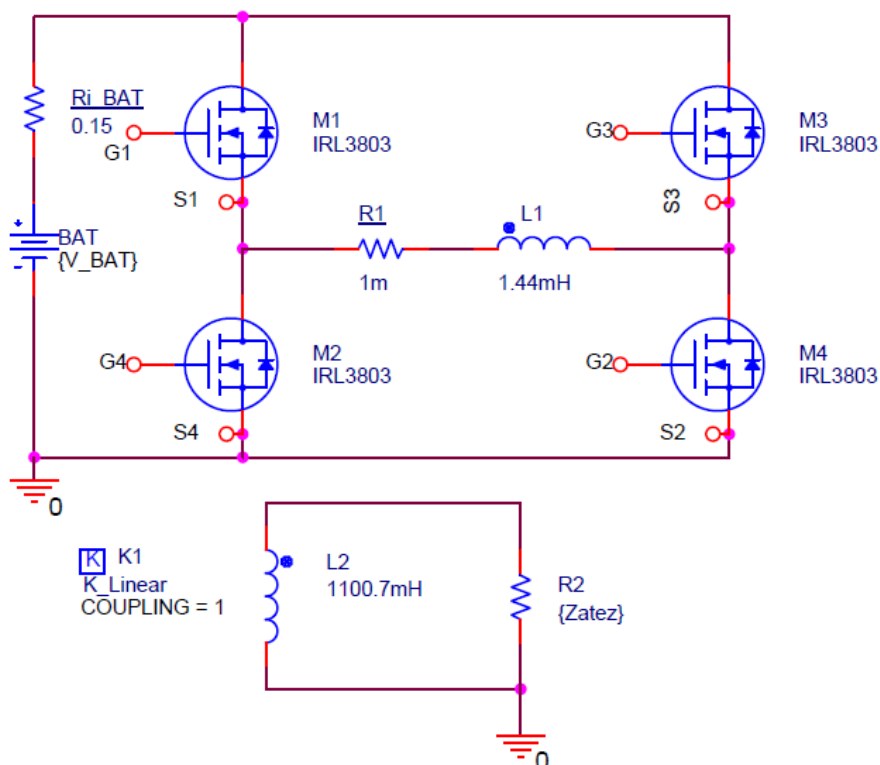
$V\_BAT = 12.4V$   
 $V_{on} = \{V\_BAT\}$   
 $V_{off} = 0V$

$TR = 120ns$   
 $TF = 50ns$   
 $PW = \{0.499/f\_out\}$

$f\_out = 50Hz$   
 $RG = 10$   
 $Zatez = 500$



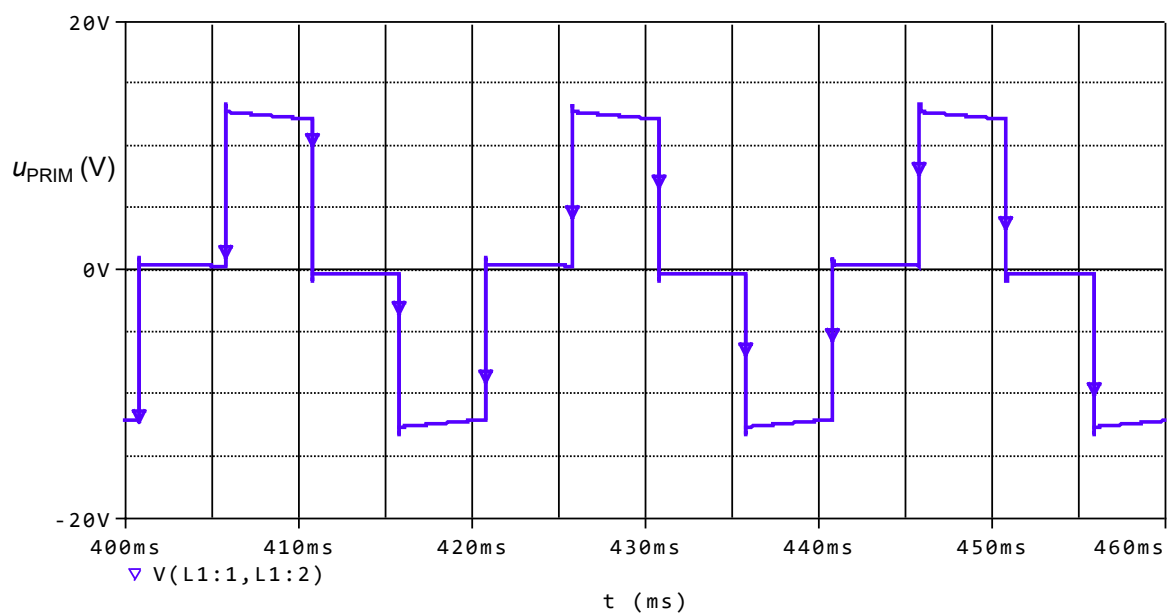
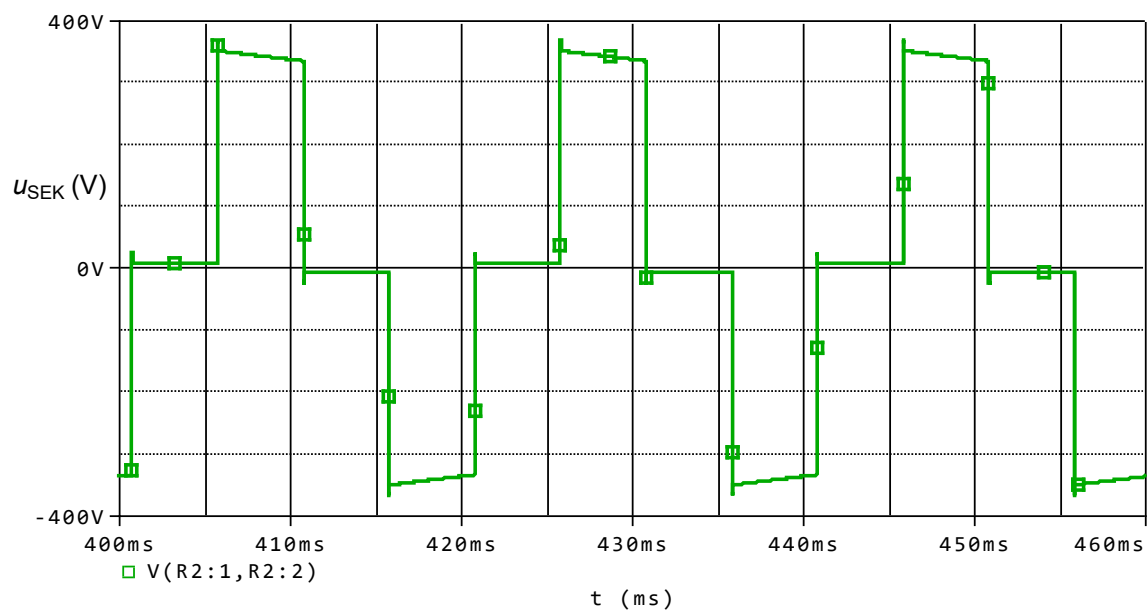
Obr. 4.1 Simulační schéma zapojení – řídicí část měniče a parametry simulace

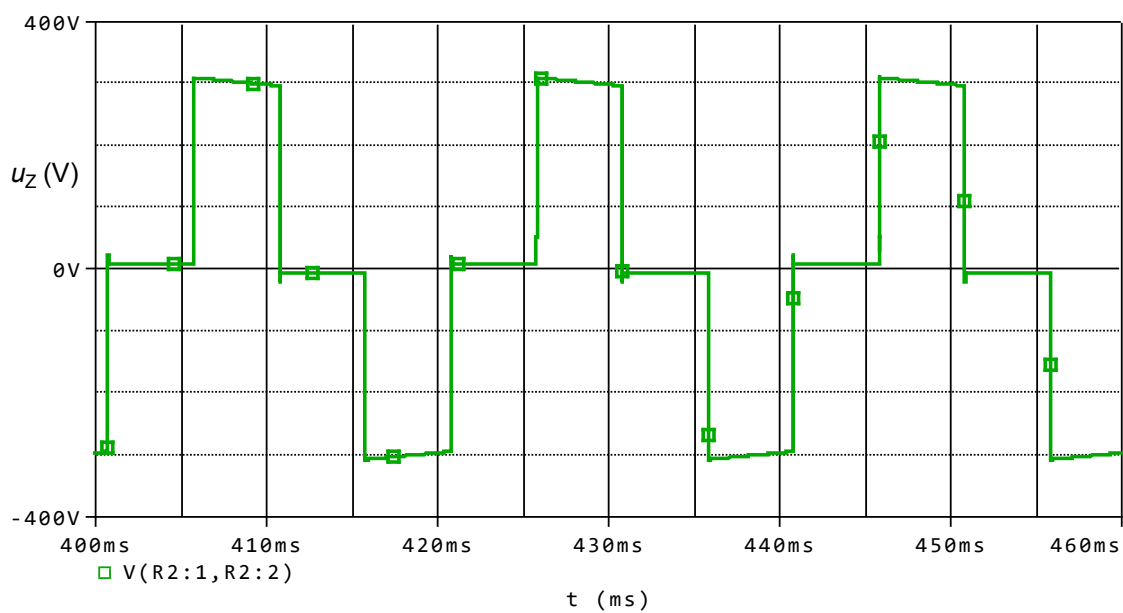


Obr. 4.2 Simulační schéma zapojení – výkonová část měniče

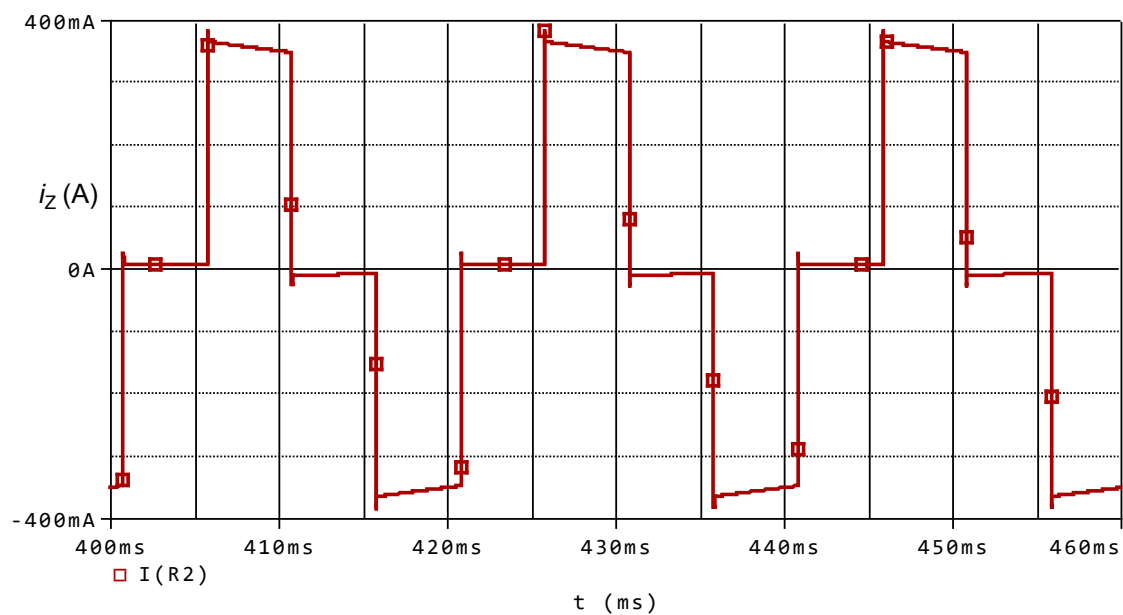
Odpor  $R_{i\_BAT}$  zařazený do série s akumulátorem symbolizuje vnitřní odpor akumulátoru a také stárí použitých akumulátorů při praktickém měření.

Ochranná doba mezi sepnutím jednotlivých tranzistorů je v simulaci vytvořena uměle v nastavení jejich spínání. Šířka pulzů je nastavena na hodnotu  $0,499/f_{OUT}$ , tím je zabezpečeno, že nejsou sepnuty dva tranzistory v jedné větvi zároveň a nedojde k tvrdému zkratu zdroje. Tento tvrdý zkrat musí být u akumulátoru zvlášť ošetřen, protože akumulátor má velmi velký zkratový proud v řádech stovek ampérů a došlo by k naprosté destrukci zařízení. V praxi není poměr střídý 1:1 dosažitelný, vždy je mezi sepnutím tranzistorů nějaká prodleva, v tomto případě je obvod IR2153 vybaven funkcí pro generování ochranné doby (deadtime) mezi spínáním jednotlivých tranzistorů. Doba náběžné a sestupné hrany pulzu pro sepnutí tranzistoru je převzata z datasheetu obvodu IR2153 (Tab. 3.1).

Obr. 4.3 Časový průběh napětí  $u_{\text{PRIM}}(t)$  na primární straně transformátoru ve stavu naprázdnoObr. 4.4 Časový průběh napětí  $u_{\text{SEK}}(t)$  na sekundární straně transformátoru ve stavu naprázdno

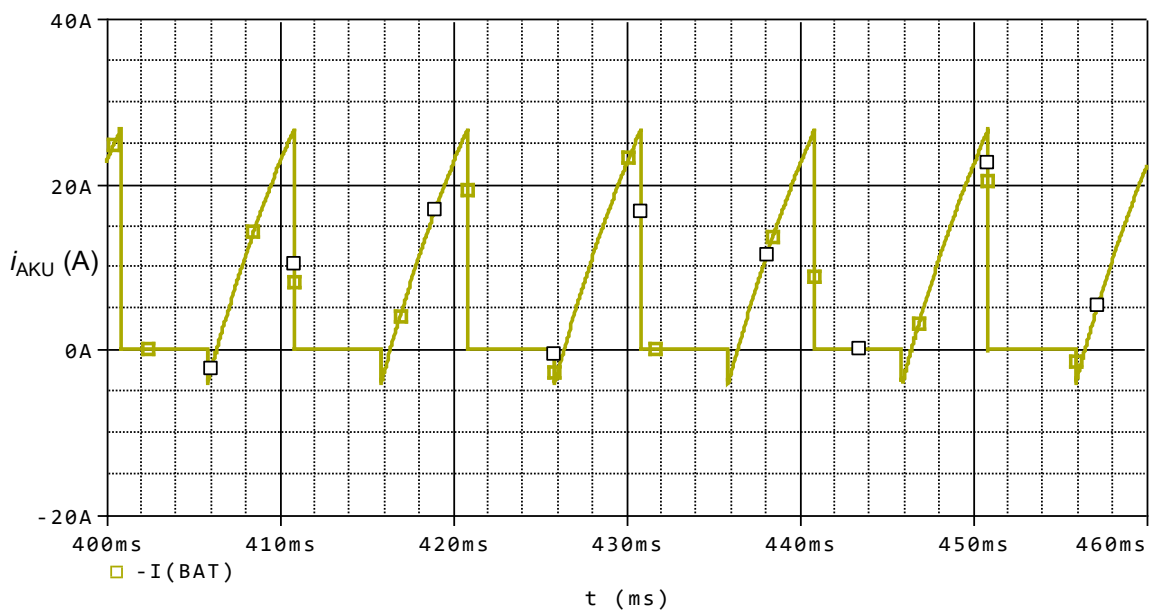


Obr. 4.5 Časový průběh napětí  $u_Z(t)$  na sekundární straně transformátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce

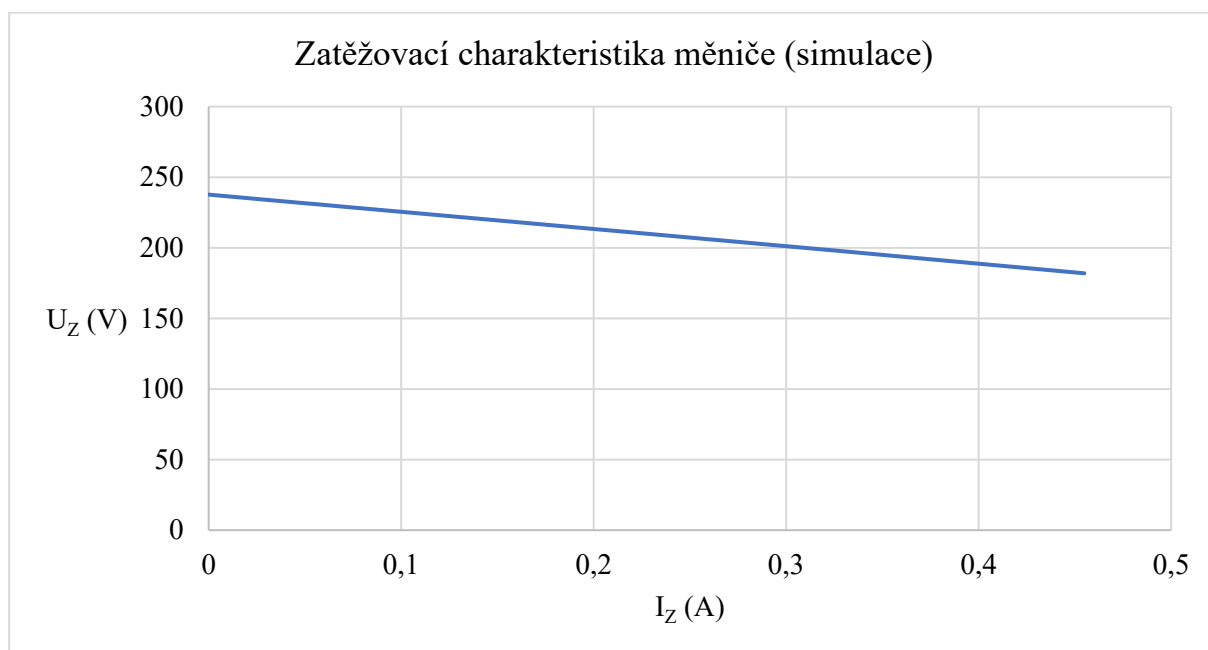


Obr. 4.6 Časový průběh proudu  $i_Z(t)$  na sekundární straně transformátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce

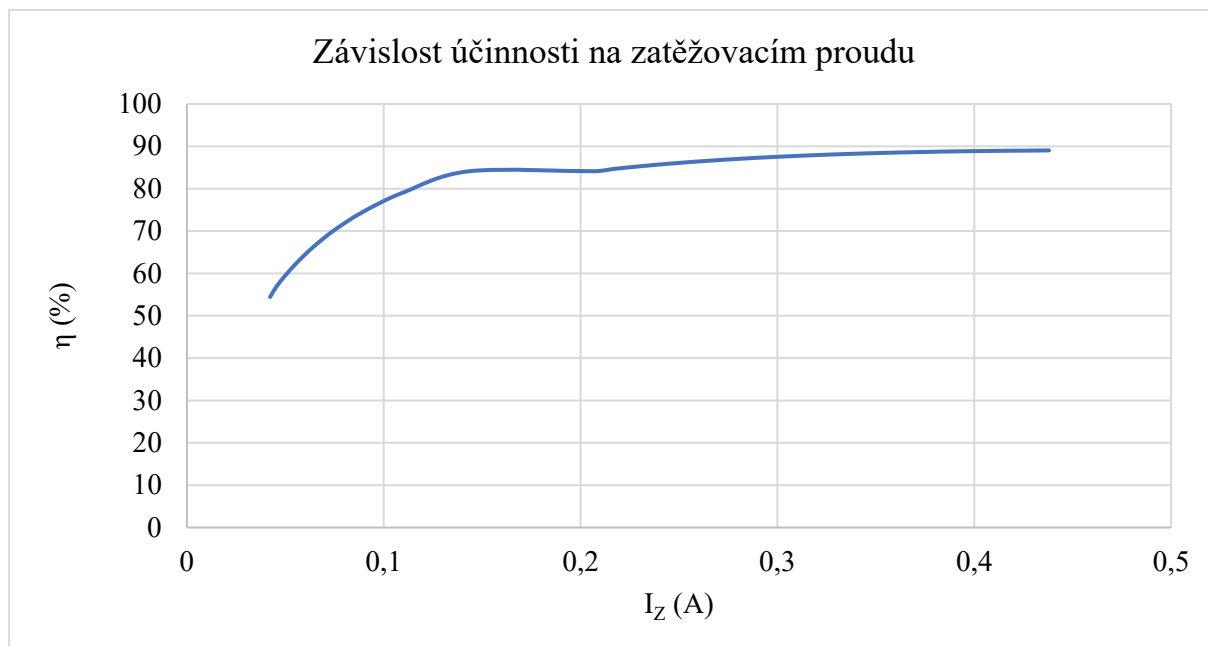




Obr. 4.7 Časový průběh proudu  $i_{AKU}(t)$  odebíraného z akumulátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce



Obr. 4.8 Simulovaná zatěžovací charakteristika měniče v prostředí OrCAD/PSpice

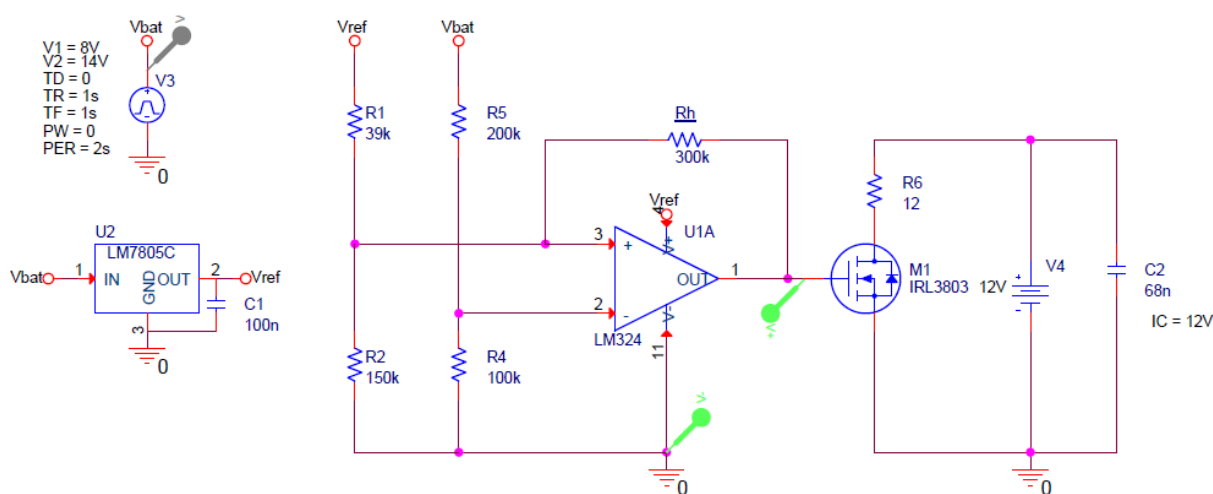


Obr. 4.9 Simulovaná závislost účinnosti na zatěžovacím proudu v prostředí OrCAD/PSpice

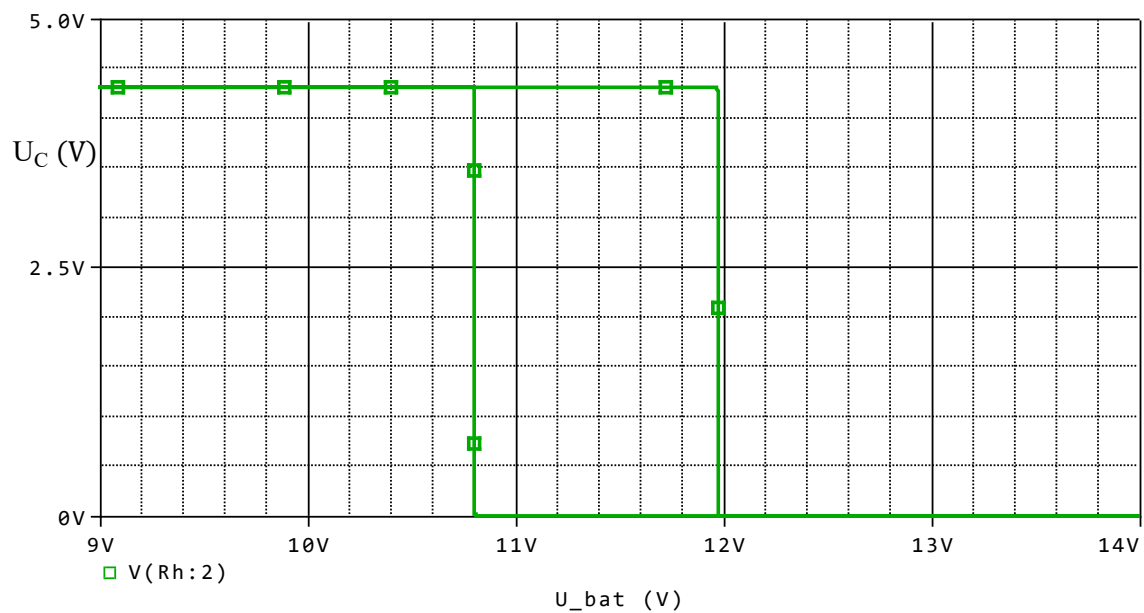
#### 4.2 Simulace komparátoru pro ochranu akumulátoru v programu OrCAD/PSpice

Pro realizace komparátoru, který má za úkol zablokovat oscilátor obvodu je použit obvod LM324, který ve svém pouzdře obsahuje 4 bipolární operační zesilovače. Komparátor bude napájen stabilizovaným napětím o velikosti 5 V, které zajistí obvod LM7805. Stabilizátor je v obvodu zařazen, aby napájecí napětí komparátoru neklesalo s klesajícím napětím akumulátoru. V případě komparátoru není potřeba sepnout tranzistor velmi rychle, protože napětí akumulátoru se mění velmi pomalu, proto je 5 V dostačující pro spínání tranzistoru. Návrh tohoto zapojení je uveden v kapitole 3.2.

Obvod MOSFET tranzistoru na výstupu komparátoru je v zapojení na Obr. 4.10 uveden pouze demonstračně a jedná se o zapojení pro vypnutí obvodu doporučené výrobcem (Obr. 3.2).



Obr. 4.10 Simulační schéma obvodu pro ochranu akumulátoru před vybitím



Obr. 4.11 Závislost výstupního napětí komparátoru  $U_C$  na napětí akumulátoru  $U_{bat}$  (převodní charakteristika komparátoru)

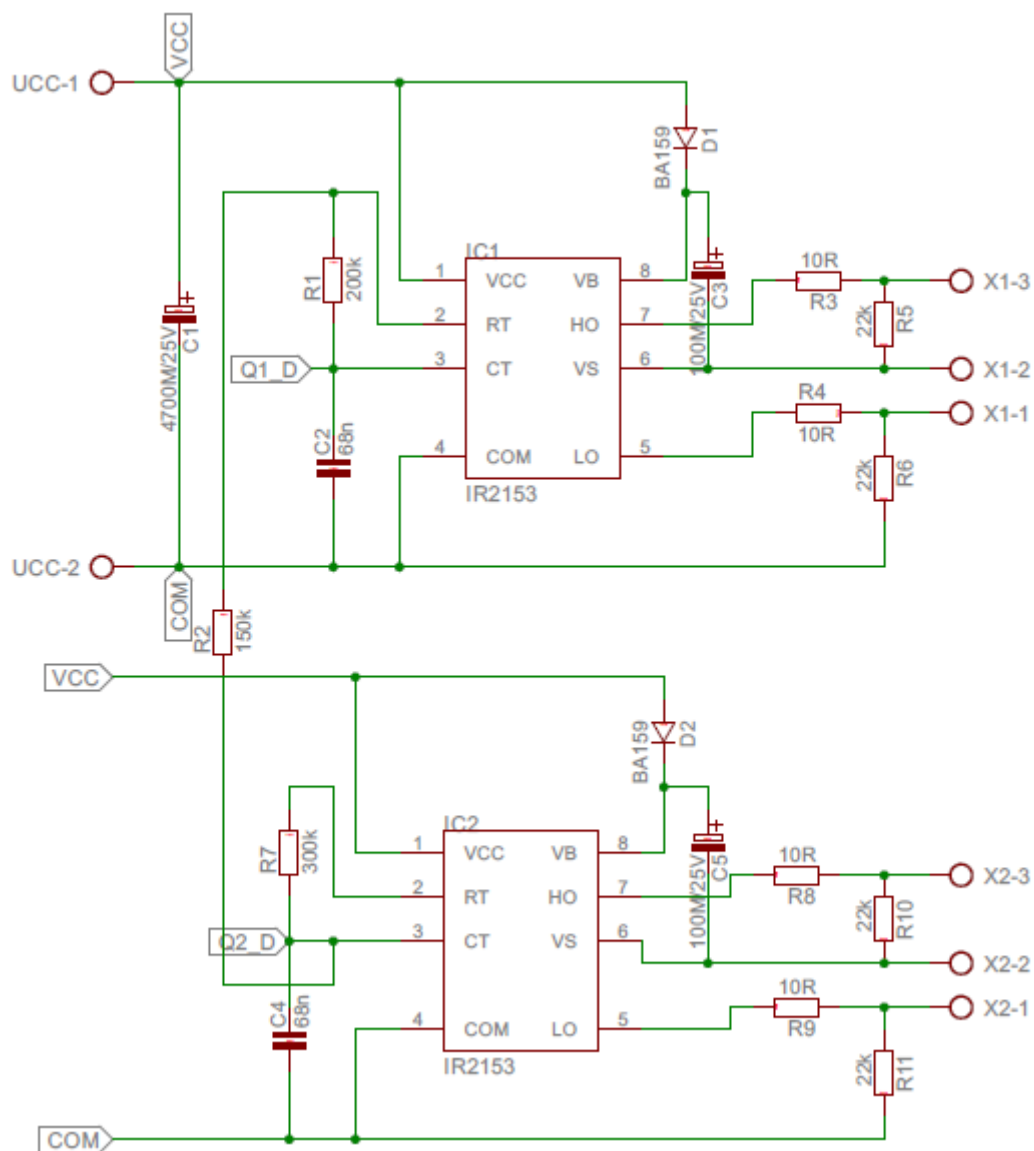
Z grafu Obr. 4.11 je patrné, že komparátor se při nárůstu napětí akumulátoru zapne při napětí 12 V a při poklesu vypne při napětí 10,8 V.

## 5 Realizace zapojení a návrh desek plošných spojů

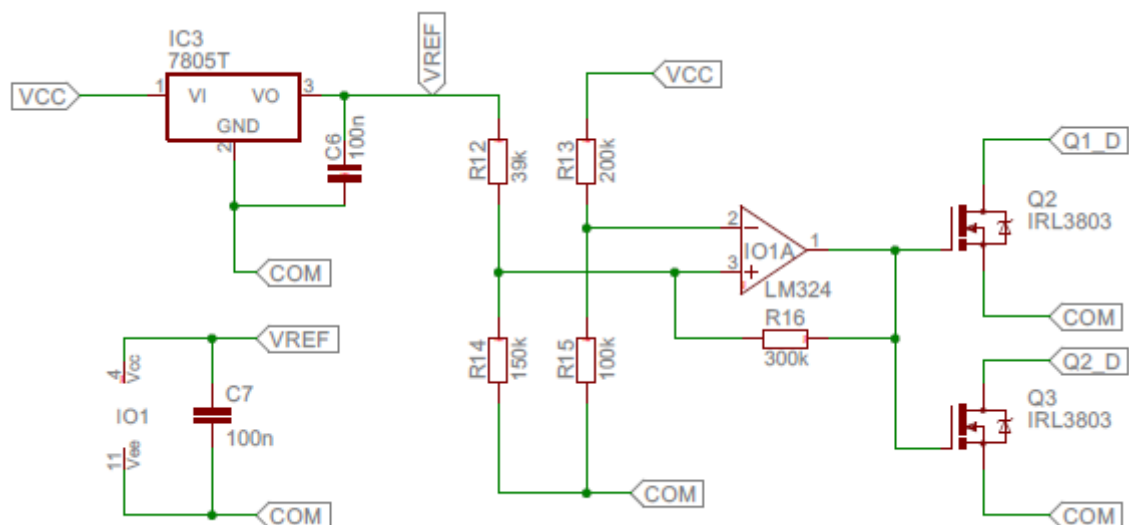
Návrhy desek plošných spojů byl vytvořen pomocí software Eagle. Z důvodu menší prostorové náročnosti je měnič rozdělen na výkonovou a řídicí část. Tyto dvě části jsou propojeny vodiči, jež vedou pulzy z řídicí části na spínací tranzistory umístěné ve výkonové části. Každá z částí měniče má také své vlastní přívodní vodiče pro napájení, a to z důvodu odlišného průřezu těchto napájecích vodičů.

Použité integrované obvody jsou umístěny v patcích, které umožňují snadnou výměnu těchto obvodů v případě zničení.

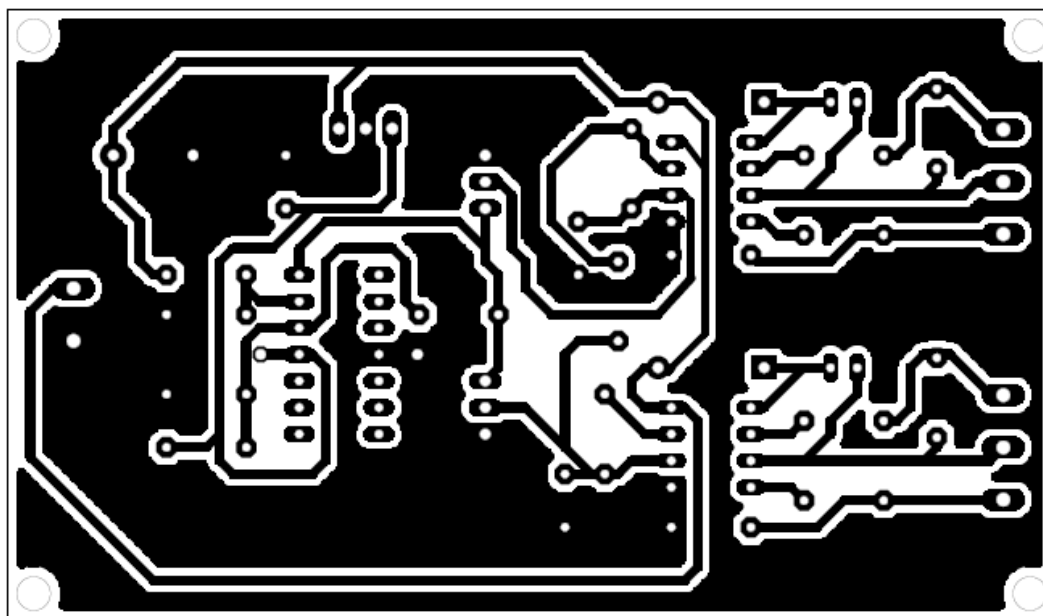
Rozměry desek jsou 100 x 55 mm, obě desky mají stejnou velikost, aby bylo možné je pomocí distančních sloupků spojit do jednoho celku nad sebe a ušetřit tak místo při případném umístění do šasi.



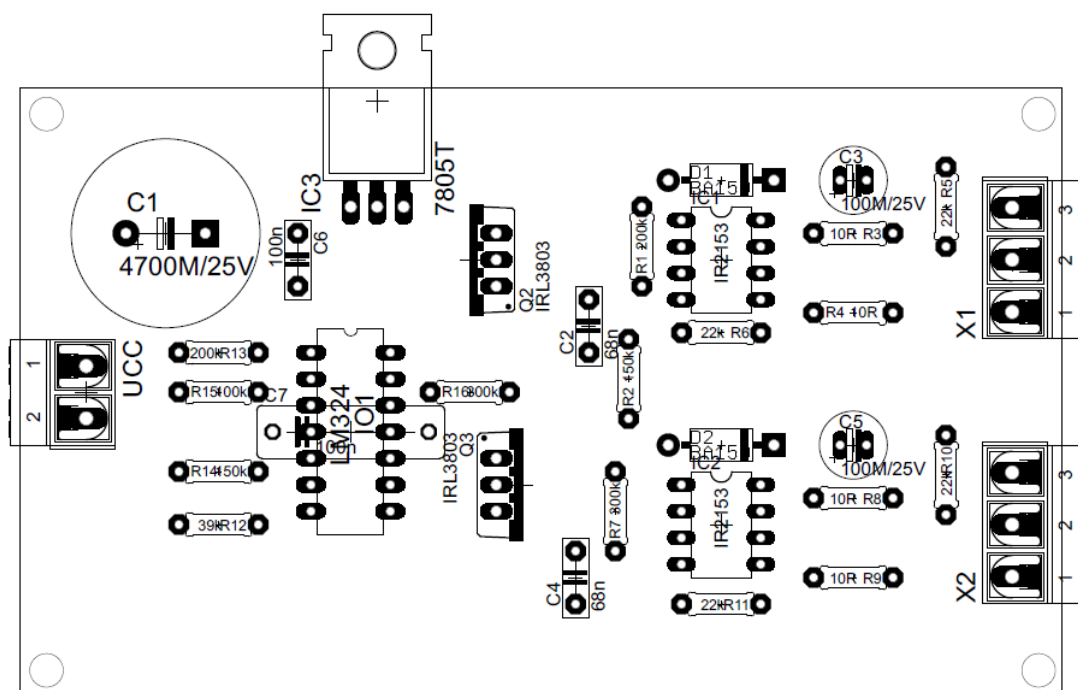
Obr. 5.1 Schéma řídicí části obvodu pro návrh desky plošného spoje (budič výkonových tranzistorů)



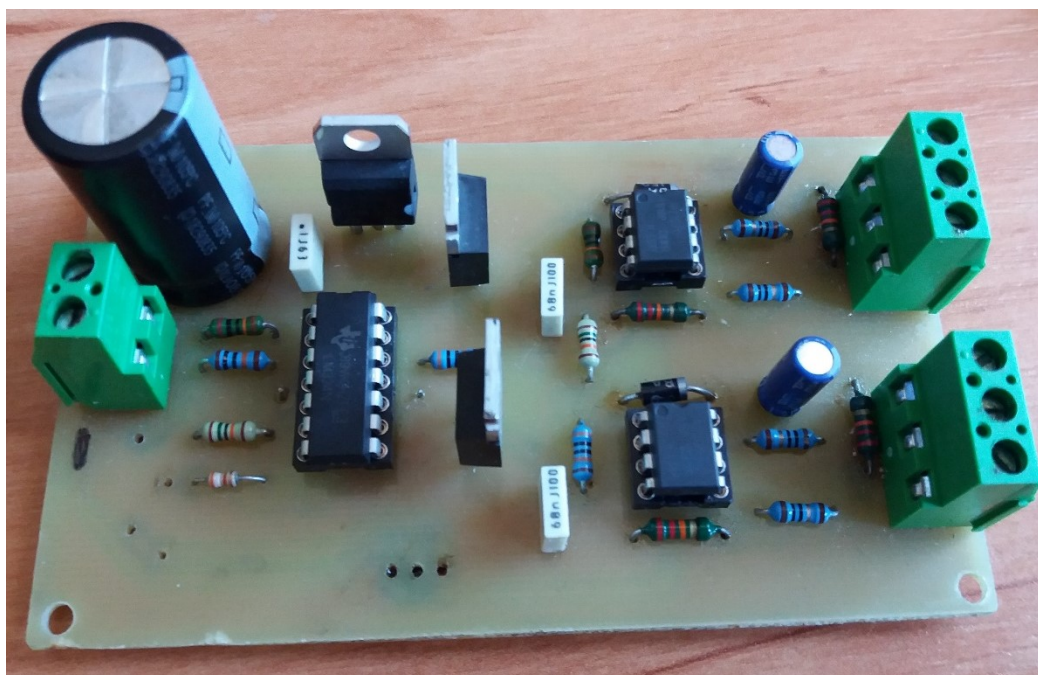
Obr. 5.2 Schéma řídicí části obvodu pro návrh desky plošného spoje (komparátor pro ochranu akumulátoru před hlubokým vybitím)



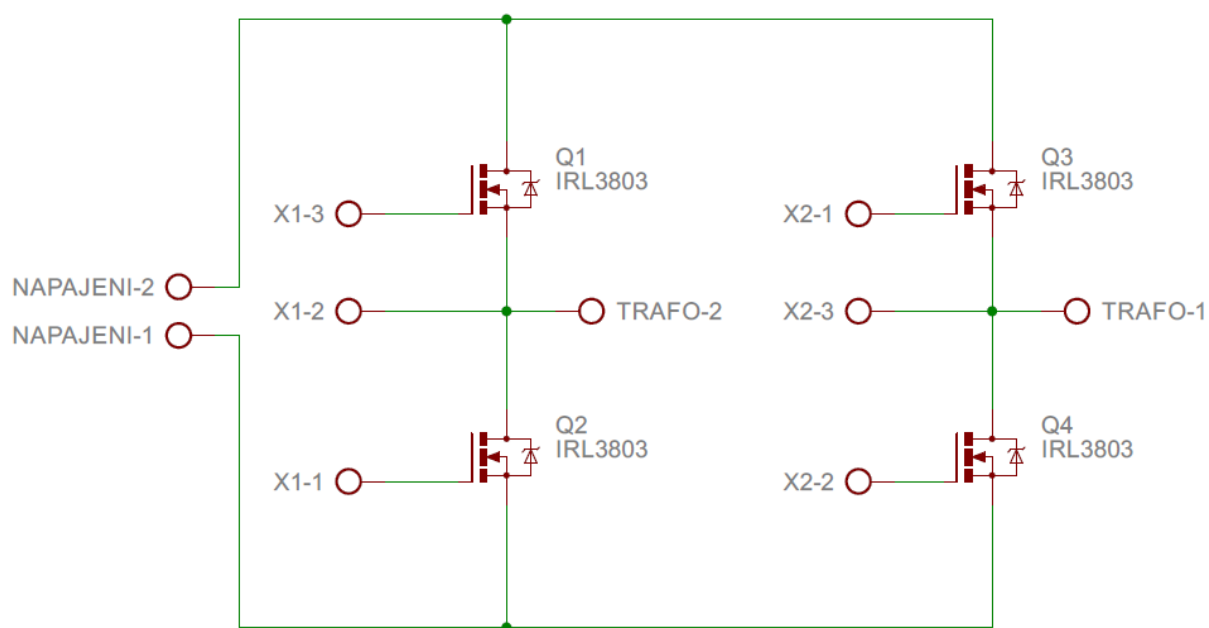
Obr. 5.3 Deska plošných spojů pro řídicí část měniče, pohled shora



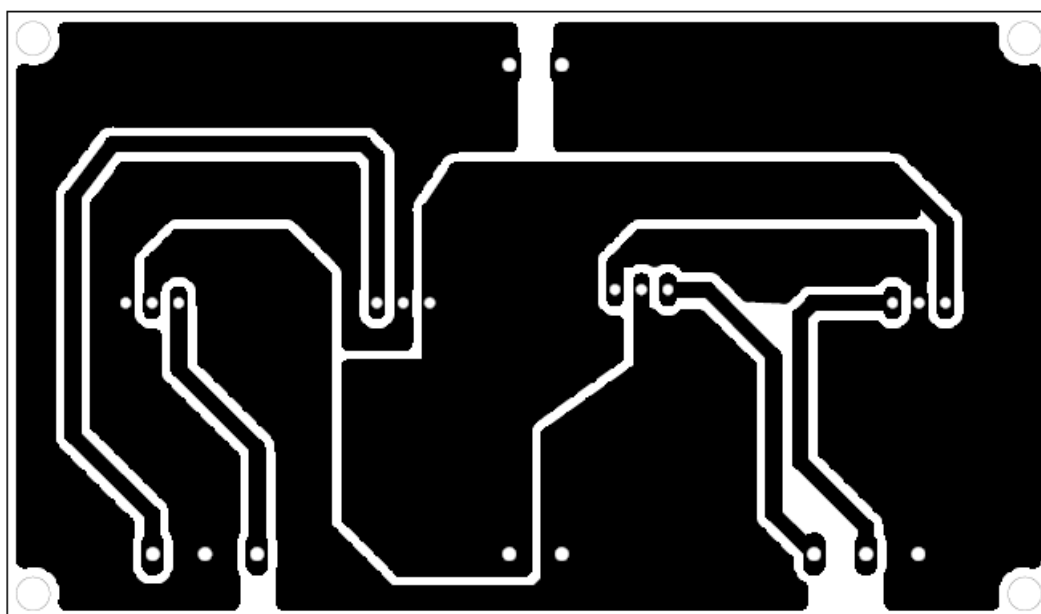
Obr. 5.4 Osazovací výkres pro desku plošných spojů – řídicí část měniče, pohled shora



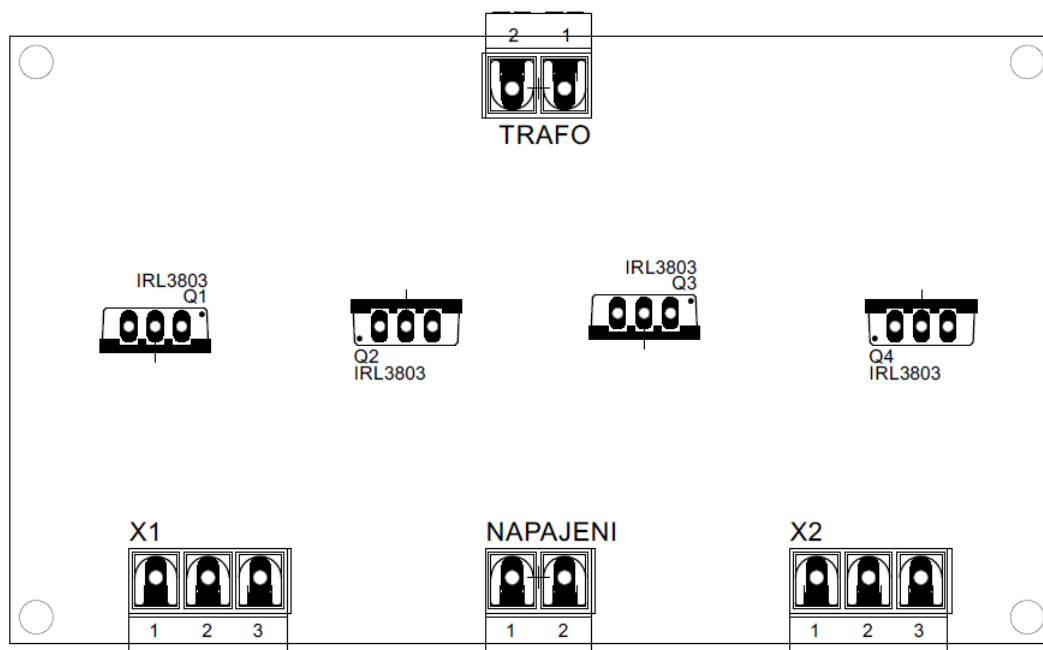
Obr. 5.5 Osazená DPS – řídicí část měniče



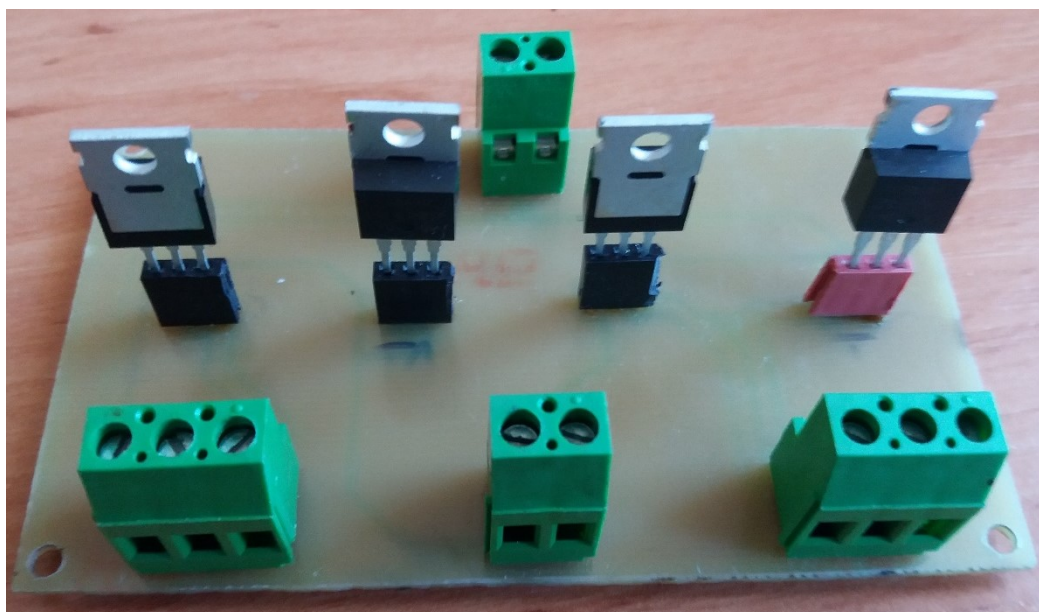
Obr. 5.6 Schéma výkonové části obvodu pro návrh desky plošného spoje



Obr. 5.7 Deska plošných spojů pro výkonovou část měniče, pohled shora



Obr. 5.8 Osazovací výkres pro desku plošných spojů – výkonová část měniče, pohled shora



Obr. 5.9 Osazená DPS – výkonová část měniče



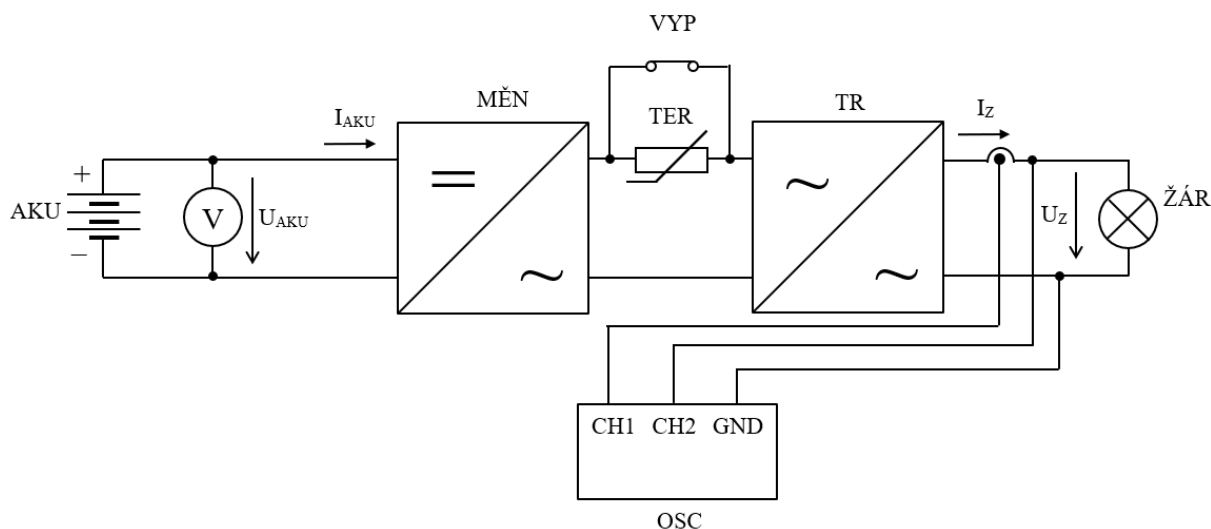
## 6 Ověření funkčnosti měniče a měření

Při měření bylo nutné omezit záběrný proud použitého toroidního transformátoru, proto byl použit termistor se záporným teplotním koeficientem (NTC). Po proběhlé magnetizaci transformátoru byl tento termistor zkratován vypínačem, aby nedošlo k omezení proudu transformátoru a vzniku ztrát.

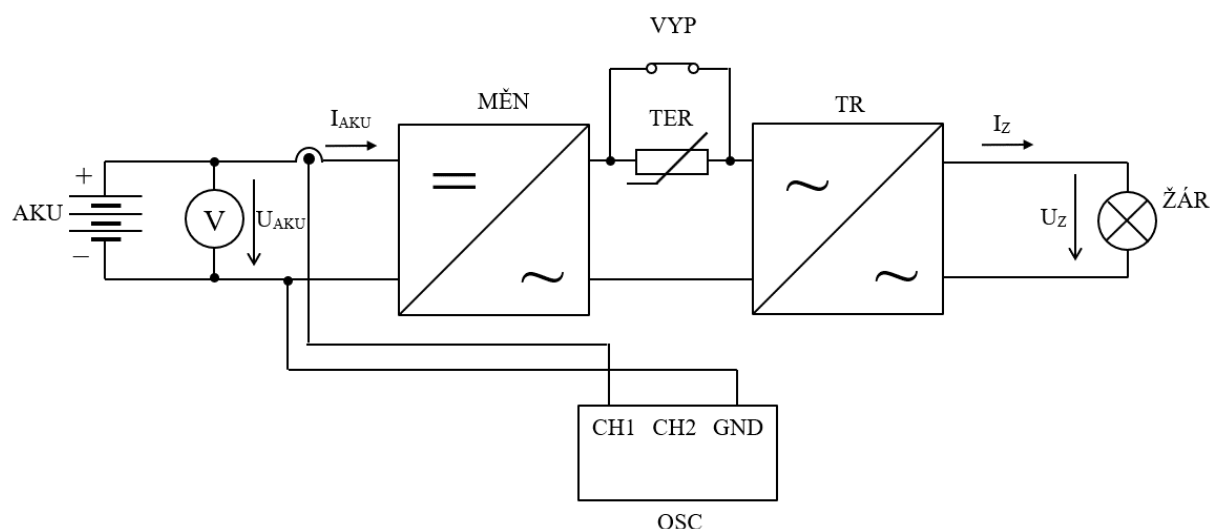
Střední hodnotu proudu odebíraného z akumulátoru bylo nutno měřit proudovou sondou, protože měřený proud měl pulzující průběh.

Při měření byly použity tři akumulátory s různou kapacitou pro porovnání chování a vlastností měniče.

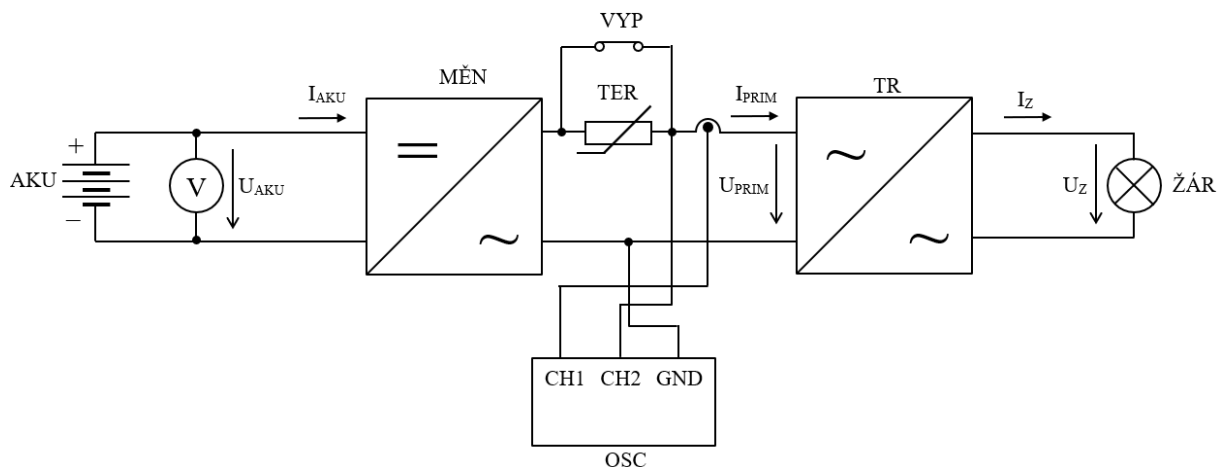
### 6.1 Schémata zapojení pro měření



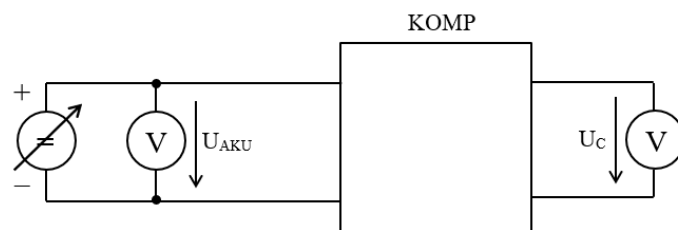
Obr. 6.1 Schéma zapojení pro měření napětí na zátěži a proudu tekoucího do zátěže



Obr. 6.2 Schéma zapojení pro měření napětí akumulátoru a odběru proudu z akumulátoru



Obr. 6.3 Schéma zapojení pro měření napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru a proudu tekoucího tímto vinutím



Obr. 6.4 Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky komparátoru pro ochranu akumulátoru před hlubokým vybitím

Tab. 6.1 Použité přístroje při měření měniče

Přístroj	Parametry přístroje	Označení ve schématu
Akumulátor 12 V	44 Ah/ 56 Ah/ 140 Ah	AKU
Měnič	12 V = / 9 V ~	MĚN
Termistor	NTC Termistor	TER
Vypínač	-	VYP
Transformátor	9 V / 230 V	TR
Žárovka	25 W/40 W/60 W/75 W/100 W/116 W	ŽÁR
Voltmetr	Agilent U1241A	V
Osciloskop	Agilent DSO1012A, 100 MHz	OSC

## 6.2 Tabulky naměřených hodnot

Tab. 6.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 44 Ah

P <sub>ŽÁR</sub> (W)	U <sub>Z</sub> (V)	I <sub>Z</sub> (A)	U <sub>AKU</sub> (V)	I <sub>AKU</sub> (A)	η (%)
0	251	0	-	-	-
25	217	0,134	12,51	2,59	89,74
40	206	0,181	12,44	3,44	87,13
60	191	0,271	12,36	5,35	78,28
75	186	0,309	12,35	6,11	76,17
100	165	0,410	12,31	7,58	72,50
116	157	0,435	12,29	8,39	66,23

Tab. 6.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 56 Ah

P <sub>ŽÁR</sub> (W)	U <sub>Z</sub> (V)	I <sub>Z</sub> (A)	U <sub>AKU</sub> (V)	I <sub>AKU</sub> (A)	η (%)
0	249	0	-	-	-
25	221	0,13	12,52	2,57	89,29
40	208	0,187	12,48	3,65	85,39
60	196	0,274	12,41	5,42	79,84
75	191	0,314	12,40	6,27	77,14
100	167	0,408	12,36	7,96	69,25
116	158	0,436	12,35	8,45	66,01

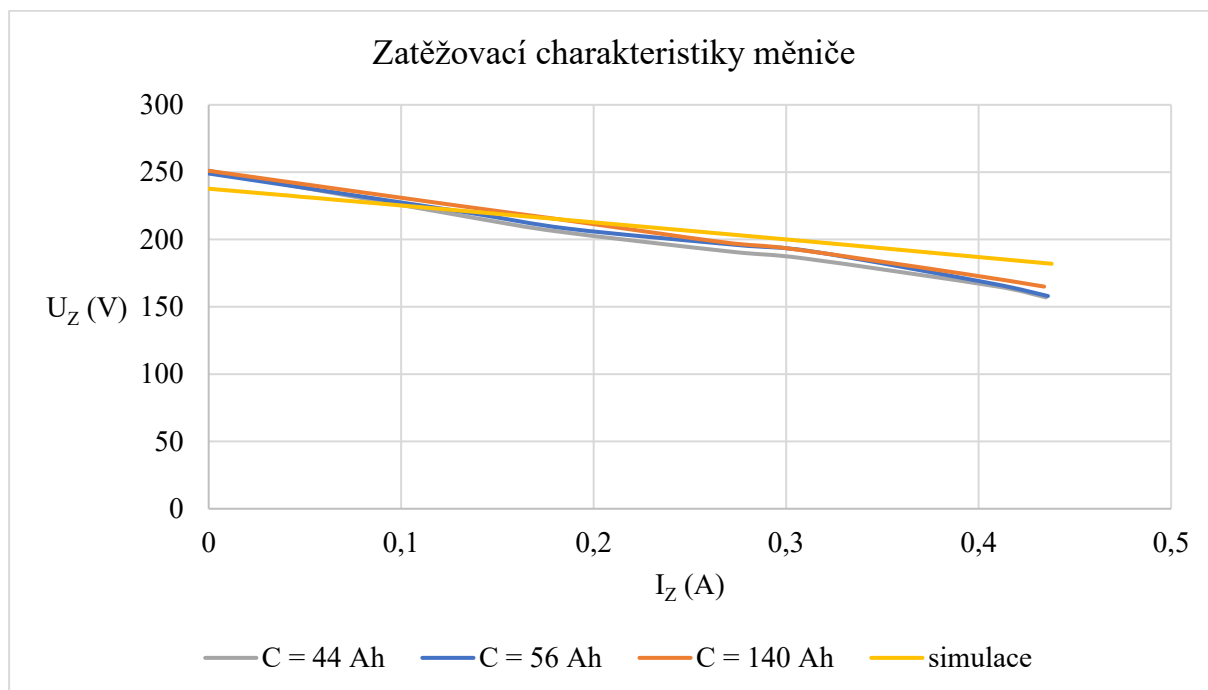
Tab. 6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 140 Ah

P <sub>ŽÁR</sub> (W)	U <sub>Z</sub> (V)	I <sub>Z</sub> (A)	U <sub>AKU</sub> (V)	I <sub>AKU</sub> (A)	η (%)
0	251	0	-	-	-
25	225	0,13	12,41	2,6	90,65
40	215	0,182	12,38	3,59	88,04
60	198	0,267	12,35	5,32	80,46
75	193	0,303	12,23	5,94	80,50
100	175	0,39	12,21	7,52	74,33
116	165	0,434	12,2	8,9	65,95

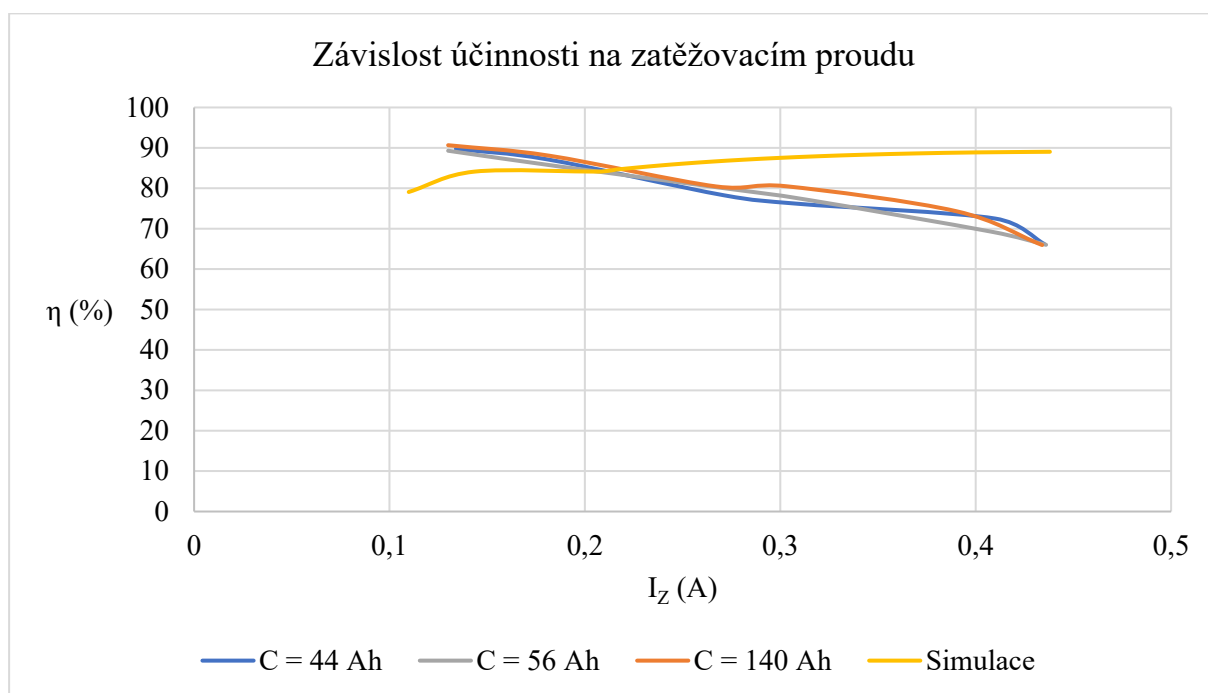
Příklad výpočtu pro zvýrazněnou buňku z Tab. 6.2:

$$\eta (\%) = \frac{U_Z \cdot I_Z}{U_{AKU} \cdot I_{AKU}} \cdot 100 = \frac{217 \cdot 0,134}{12,51 \cdot 2,59} \cdot 100 = 89,74 \% \quad (6.1)$$

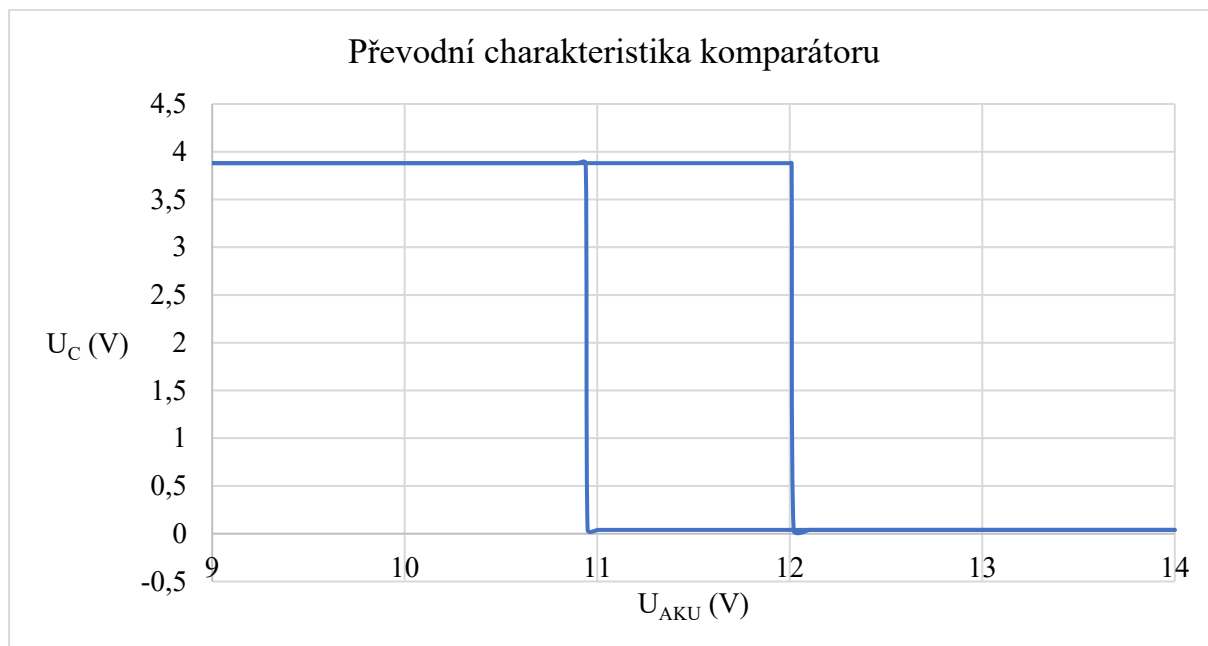
## 6.3 Naměřené charakteristiky měniče



Obr. 6.5 Naměřené zatěžovací charakteristiky měniče při použití akumulátoru s různou kapacitou a porovnání se simulací



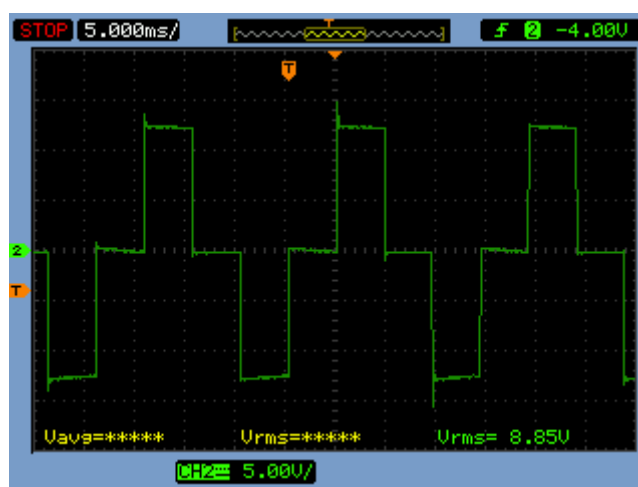
Obr. 6.6 Naměřená závislost účinnosti na zatěžovacím proudu pro akumulátory s různou kapacitou a porovnání se simulací



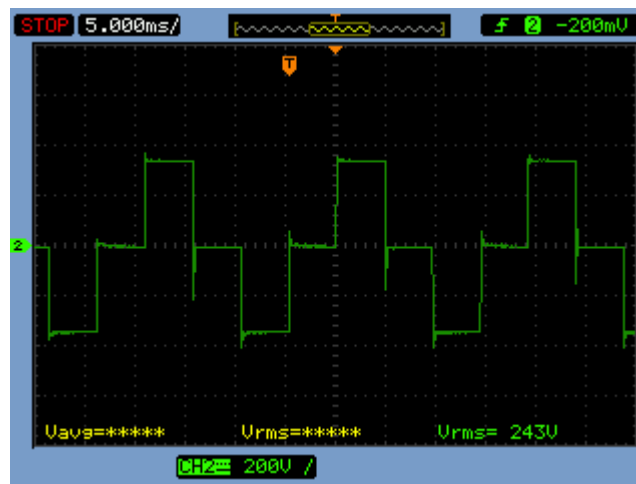
Obr. 6.7 Naměřená převodní charakteristika komparátoru

Komparátor se vypíná při napětí 10,94 V a zapíná při napětí 12,02 V.

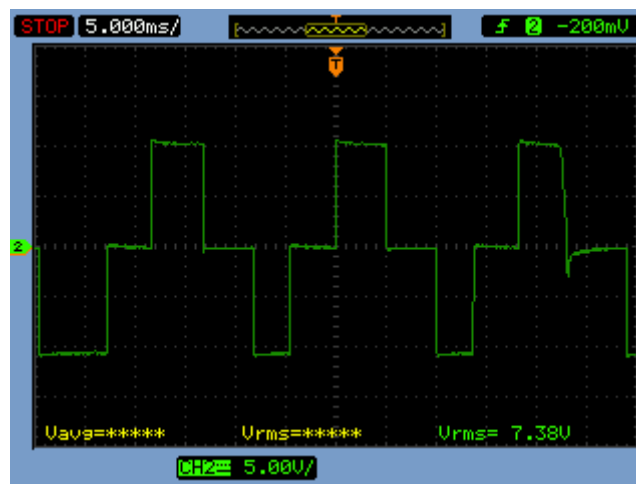
#### 6.4 Průběhy napětí a proudů měniče



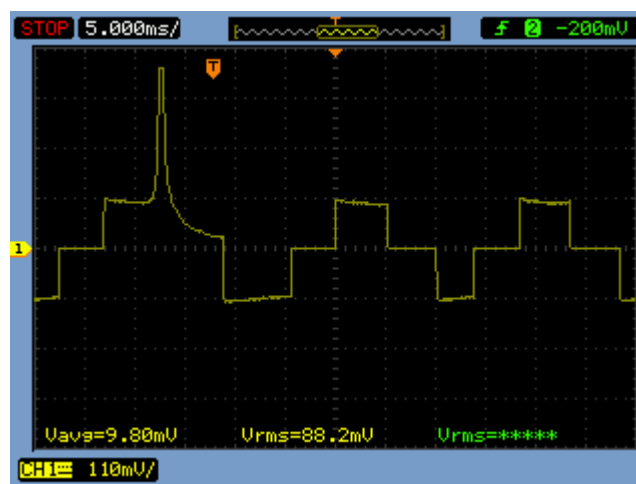
Obr. 6.8 Průběh napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru, stav naprázdno



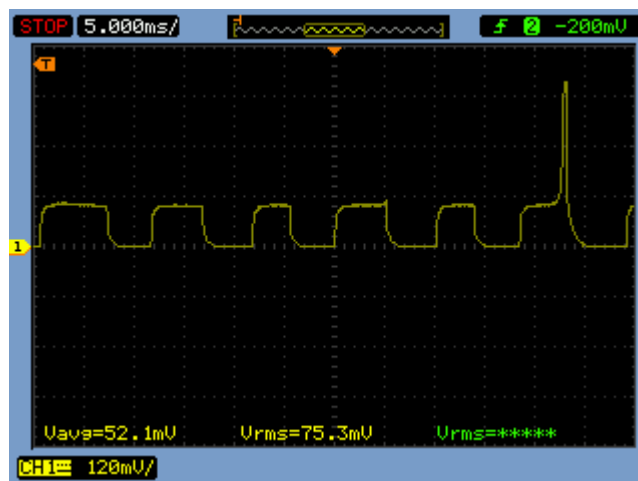
Obr. 6.9 Průběh napětí na vinutí vyššího napětí transformátoru, stav naprázdno



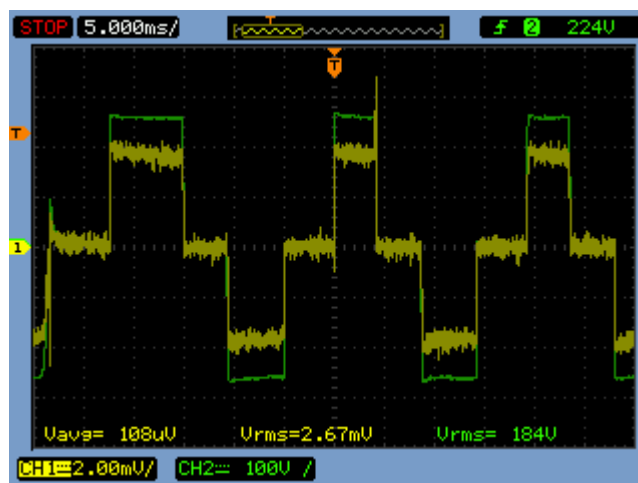
Obr. 6.10 Průběh napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru, zátěž 60 W žárovka



Obr. 6.11 Průběh proudu tekoucího vinutím nižšího napětí transformátoru, zátěž 60 W žárovka



Obr. 6.12 Průběh proudu tekoucího z akumulátoru do měniče, zátěž 60 W žárovka



Obr. 6.13 Průběh napětí na zátěži a proudu tekoucího zátěží vinutí vyššího napětí, zátěž 60 W žárovka

## 7 Zhodnocení výsledků a závěr

První část této práce se zaměřuje na srovnání existujících topologií měničů 12 V DC / 230 V AC. Z tohoto porovnání vyplynulo, že pro realizaci je nejvhodnější měnič s tvarem výstupního napětí odpovídajícího modifikovanému sinusovému průběhu. Tento druh měniče je možné realizovat bez nutnosti složitých spínacích algoritmů (k jeho řízení postačí dva integrované obvody). Tato topologie má také poměrně slušnou účinnost.

V další části jsou popsány parametry a charakteristiky součástek použitých při realizaci měniče. Měnič byl také doplněn o podpěťovou ochranu, tj. hysterezní komparátor, který hlídá napětí akumulátoru a chrání jej před hlubokým vybitím, vypnutím měniče. Obsahem této části bylo také určení ztrátového výkonu na tranzistorech a vypočítání parametrů chladiče pro tyto tranzistory.

Následně byl vytvořen simulační model pro zvolenou topologii měniče v prostředí OrCAD/ PSpice. Při tvorbě modelu měniče došlo k určitému zjednodušení, a to z důvodu absence simulačního modelu pro obvod IR2153. Tento obvod byl, za účelem simulace, nahrazen impulzními zdroji. Na sestaveném modelu byla provedena výkonová analýza, konkrétně simulace zatěžovacích charakteristik a celkové účinnosti zařízení. Byla také provedena simulace chování navrženého hysterezního komparátoru, konkrétně jeho převodní charakteristika.

Desky plošných spojů byly navrženy pomocí programu EAGLE. Následně jsme desky, dle návrhů, vyrobili a osadili ve školní dílně.

U toroidního transformátoru, použitého pro praktickou realizaci, bylo nutné přidat cca 120 závitů do série s původním vinutím vyššího napětí, za účelem zvýšení výstupního napětí. Toto výstupní napětí se jevílo jako příliš nízké, obzvláště při zatížení měniče. Pro bezproblémový rozběh měniče bylo nutné zařadit do obvodu vinutí nižšího napětí transformátoru NTC termistor z důvodu velkého proudového nárazu při spouštění transformátoru naprázdno. Tento proudový náraz způsoboval destrukci spínacích tranzistorů.

Měření na oživeném měniči bylo realizováno se třemi akumulátory s různými kapacitami. Ze zatěžovacích charakteristik na Obr. 6.5 je patrné, že naměřené charakteristiky jsou měkčí a mají vyšší pokles napětí, než je u simulovaného měniče. Poměrně velké rozdíly jsou také patrné z Obr. 6.6, kdy účinnost u simulovaného měniče roste se zatížením (až do bodu daného jmenovitým zatížením transformátoru), u reálného měniče účinnost s rostoucím zatížením klesá. Tento pokles účinnosti je způsoben vlastnostmi použitého budiče, který nemá dostatečný budicí výkon. Vlivem nedostatečného budicího výkonu není budič schopen pro vyšší zatěžovací proudy spolehlivě spínat tranzistory v můstku. Ve stavu naprázdno se průběhy měniče shodovaly se simulovanými průběhy napětí.

Na Obr. 6.12, zobrazujícím časový průběh odebíraného proudu z akumulátoru, se objevila proudová špička při odběru proudu z akumulátoru. Tato proudová špička odpovídá krátkému nadproudu odebíraného z akumulátoru a poukazuje patrně na nežádoucí sepnutí dvou tranzistorů v jedné větvi H můstku. Vliv nedokonalého buzení je také patrný z Obr. 6.13, kde délka pulzů není konstantní v kladné části periody. Jako možné řešení tohoto problému se nabízí zmenšení střídý signálu pro buzení tranzistorů nebo zvětšení ochranné doby mezi sepnutím jednotlivých tranzistorů.



Účinnost realizovaného měniče se pohybuje pro malé zátěže (cca do 60 W) nad 80 %, při vyšším zatížení rychle klesá, a pro zátěž okolo 100 W má měnič účinnost pouze okolo 65 %, což je ekonomicky nevýhodné.

Naměřená převodní charakteristika navrženého komparátoru na Obr. 6.7 se téměř shoduje se simulovanou charakteristikou na Obr. 4.11. Skutečný komparátor oproti simulaci odpojí budící obvod při vyšším napětí akumulátoru, což není nežádoucí. Tento malý rozdíl v komparačních úrovních je způsobený vlastnostmi reálných součástek.

Dosažené výsledky by bylo možné zlepšit použitím výkonnějšího budiče, který by tranzistory dokázal spolehlivě spínat. Nedocházelo by k nežádoucím zkratům zdroje a naměřené charakteristiky měniče by se přiblížily více k simulovaným.

## Seznam použité literatury

- (1) Měnič 12 V / 230 V 50 Hz s obdélníkem a 555kou. *DANYK.CZ - Elektrotechnika, schémata, návody* [online]. Dostupné z: <http://danyk.cz/menic230.html>
- (2) Měnič 12 V / 230 V 50 Hz s obdélníkem a IR2153. *DANYK.CZ - Elektrotechnika, schémata, návody* [online]. Dostupné z: [http://danyk.cz/menic230\\_4.html](http://danyk.cz/menic230_4.html)
- (3) Měnič 12 V / 230 V 50 Hz s modifikovanou sinusovkou. *DANYK.CZ - Elektrotechnika, schémata, návody* [online]. Dostupné z: [http://danyk.cz/menic230\\_5.html](http://danyk.cz/menic230_5.html)
- (4) Spínaný měnič 12 V / 230 V 150 W s modifikovanou sinusovkou. *DANYK.CZ - Elektrotechnika, schémata, návody* [online]. Dostupné z: [http://danyk.cz/menic230\\_6.html](http://danyk.cz/menic230_6.html)
- (5) A simple electronic ballast on the chip IR2153. Scheme, description. *Портал – Электрик в быдунку* [online]. Copyright © 2019 electric [cit. 29.12.2019]. Dostupné z: <https://electric-in-home.com/en/simple-electronic-ballast-on-the-chip-ir2153-scheme-description/>
- (6) Inverter Types & Working Principle | Sine Wave, Square Wave, Modified Sine Wave Inverter Working | Electrical Academia. *Electrical Academia | Learn Electrical Technology Online For Free* [online]. Copyright © Copyright 2019, All Rights Reserved. Dostupné z: <https://electricalacademia.com/renewable-energy/inverter-types-working-principle-sine-wave-square-wave-modified-sine-wave-inverter-working/>
- (7) Datasheet IRL3803. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.213-188.1.pdf>
- (8) Datasheet IR2153. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.399-159.1.pdf>
- (9) TST 160/066 INDEL – Transformátor: toroidní | 160VA; 230VAC; 9V; 17,77A; 1,7kg; Ø: 115mm; TST160W/9V | TME Czech Republic s.r.o. - Elektronické součástky. [online]. Dostupné z: [https://www.tme.eu/cz/details/tst160w\\_9v/toroidni-transformatory/indel/tst-160-066/](https://www.tme.eu/cz/details/tst160w_9v/toroidni-transformatory/indel/tst-160-066/)
- (10) Using the Inductor Coupling Symbols | PSpice. *Electronic Circuit Optimization & Simulation | Cadence PSpice | PSpice* [online]. Copyright © Copyright 2016 Cadence Design Systems, Inc. All rights reserved. Dostupné z: <https://www.pspice.com/resources/application-notes/using-inductor-coupling-symbols>
- (11) Inverting Comparator With Hysteresis Circuit | Texas Instruments. [online]. © Copyright 1995-2019 Texas Instruments Incorporated. All rights reserved. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/snoa997a/snoa997a.pdf>

## Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1.1 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem 555 .....	11
Obr. 1.2 Časový průběh výstupního napětí měniče s obdélníkovým signálem.....	11
Obr. 1.3 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem IR2153 .	12
Obr. 1.4 Schéma zapojení měniče s výstupním obdélníkovým signálem, řízeným obvodem 555, transformátor s jedním sekundárním vinutím.....	12
Obr. 1.5 Schéma zapojení měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem.....	13
Obr. 1.6 Časový průběh výstupního napětí pro měnič s modifikovaným sinusovým signálem.....	13
Obr. 1.7 Schéma zapojení spínaného měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem, část DC / DC měnič.....	14
Obr. 1.8 Schéma zapojení spínaného měniče s výstupním modifikovaným sinusovým signálem, část DC / AC měnič.....	14
Obr. 1.9 Blokové schéma měniče s výstupním harmonickým napětím (6).....	15
Obr. 1.10 Časový průběh výstupního napětí pro měnič s harmonickým signálem .....	15
Obr. 1.11 Princip vzniku obdélníkového PWM signálu a harmonický signál vzniklý po filtraci (6) ...	16
Obr. 3.1 Vnitřní schéma zapojení obvodu IR2153.....	18
Obr. 3.2 Schéma zapojení doporučené výrobcem pro obvod IR2153 (8) .....	18
Obr. 3.3 Průběhy napájecího napětí a napětí na vstupech a výstupech obvodu (8) .....	19
Obr. 3.4 Schéma oscilátoru na vstupní straně obvodu IR2153 .....	20
Obr. 3.5 Schéma zapojení obvodu komparátoru pro ochranu akumulátoru před vybitím .....	21
Obr. 3.6 Náhradní schéma obvodu komparátoru při napětí nižším než $U_{VYP}$ .....	21
Obr. 3.7 Náhradní schéma obvodu komparátoru při napětí vyšším než $U_{ZAP}$ .....	22
Obr. 3.8 Výstupní charakteristiky MOSFET tranzistoru IRL3803 .....	24
Obr. 3.9 Určení ztrátového výkonu jednoho tranzistoru pomocí softwaru OrCAD/PSpice .....	25
Obr. 4.1 Simulační schéma zapojení – řídicí část měniče a parametry simulace .....	29
Obr. 4.2 Simulační schéma zapojení – výkonová část měniče.....	30
Obr. 4.3 Časový průběh napětí $u_{PRIM}(t)$ na primární straně transformátoru ve stavu naprázdno .....	31
Obr. 4.4 Časový průběh napětí $u_{SEK}(t)$ na sekundární straně transformátoru ve stavu naprázdno .....	31
Obr. 4.5 Časový průběh napětí $u_Z(t)$ na sekundární straně transformátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce .....	32
Obr. 4.6 Časový průběh proudu $i_Z(t)$ na sekundární straně transformátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce .....	32
Obr. 4.7 Časový průběh proudu $i_{AKU}(t)$ odebíraného z akumulátoru při zátěži odpovídající 60 W žárovce .....	33
Obr. 4.8 Simulovaná zatěžovací charakteristika měniče v prostředí OrCAD/PSpice .....	33
Obr. 4.9 Simulovaná závislost účinnosti na zatěžovacím proudu v prostředí OrCAD/PSpice .....	34
Obr. 4.10 Simulační schéma obvodu pro ochranu akumulátoru před vybitím .....	34
Obr. 4.11 Závislost výstupního napětí komparátoru $U_C$ na napětí akumulátoru $U_{bat}$ (převodní charakteristika komparátoru).....	35
Obr. 5.1 Schéma řídicí části obvodu pro návrh desky plošného spoje (budič výkonových tranzistorů)	36
Obr. 5.2 Schéma řídicí části obvodu pro návrh desky plošného spoje (komparátor pro ochranu akumulátoru před hlubokým vybitím).....	37
Obr. 5.3 Deska plošných spojů pro řídicí část měniče, pohled shora.....	37

Obr. 5.4 Osazovací výkres pro desku plošných spojů – řídicí část měniče, pohled shora .....	38
Obr. 5.5 Osazená DPS – řídicí část měniče.....	38
Obr. 5.6 Schéma výkonové části obvodu pro návrh desky plošného spoje.....	39
Obr. 5.7 Deska plošných spojů pro výkonovou část měniče, pohled shora .....	39
Obr. 5.8 Osazovací výkres pro desku plošných spojů – výkonová část měniče, pohled shora .....	40
Obr. 5.9 Osazená DPS – výkonová část měniče .....	40
Obr. 6.1 Schéma zapojení pro měření napětí na zátěži a proudu tekoucího do zátěže.....	41
Obr. 6.2 Schéma zapojení pro měření napětí akumulátoru a odběru proudu z akumulátoru .....	41
Obr. 6.3 Schéma zapojení pro měření napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru a proudu tekoucího tímto vinutím .....	42
Obr. 6.4 Schéma zapojení pro měření převodní charakteristiky komparátoru pro ochranu akumulátoru před hlubokým vybitím .....	42
Obr. 6.5 Naměřené zatěžovací charakteristiky měniče při použití akumulátoru s různou kapacitou a porovnání se simulací.....	44
Obr. 6.6 Naměřená závislost účinnosti na zatěžovacím proudu pro akumulátory s různou kapacitou a porovnání se simulací.....	44
Obr. 6.7 Naměřená převodní charakteristika komparátoru .....	45
Obr. 6.8 Průběh napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru, stav naprázdno.....	45
Obr. 6.9 Průběh napětí na vinutí vyššího napětí transformátoru, stav naprázdno .....	46
Obr. 6.10 Průběh napětí na vinutí nižšího napětí transformátoru, zátěž 60 W žárovka .....	46
Obr. 6.11 Průběh proudu tekoucího vinutím nižšího napětí transformátoru, zátěž 60 W žárovka.....	46
Obr. 6.12 Průběh proudu tekoucího z akumulátoru do měniče, zátěž 60 W žárovka .....	47
Obr. 6.13 Průběh napětí na zátěži a proudu tekoucího zátěží vinutí vyššího napětí, zátěž 60 W žárovka .....	47
Tab. 3.1 Důležité parametry obvodu IR2153 .....	20
Tab. 3.2 Důležité parametry MOSFET tranzistoru IRL3803 .....	23
Tab. 3.3 Vstupní hodnoty pro výpočet chladiče .....	24
Tab. 3.4 Důležité parametry transformátoru .....	26
Tab. 4.1 Vstupní hodnoty pro výpočet parametrů transformátoru pro simulaci .....	27
Tab. 6.1 Použité přístroje při měření měniče .....	42
Tab. 6.2 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 44 Ah .....	43
Tab. 6.3 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 56 Ah .....	43
Tab. 6.4 Naměřené a vypočtené hodnoty pro měření měniče s akumulátorem C = 140 Ah .....	43